



Universidad
Carlos III de Madrid



ESTUDIO NUMÉRICO DE ESPUMAS BALÍSTICAS SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



AUTOR: MARCOS PÉREZ TABARES
TUTOR: Dr. MARCOS RODRÍGUEZ MILLÁN
TRABAJO DE FIN DE GRADO
JULIO DE 2016

Título: ESTUDIO NUMÉRICO DE ESPUMAS BALÍSTICAS
SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS

Autor: MARCOS PÉREZ TABARES

Director: Dr. MARCOS RODRÍGUEZ MILLÁN

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo de Fin de Grado el día __ de Julio de 2016 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Hay pocos momentos en la vida donde de verdad agradecemos las cosas, ya sea porque creemos que el otro ya lo sabe, porque nos olvidamos o porque simplemente no le damos importancia necesaria. Ahora que tengo oportunidad me gustaría dar las gracias a todas esas personas que me han apoyado y han estado ahí todos estos años.

Quisiera darle las gracias a mi padre, a mi madre y a mi hermano, ellos me han dado la oportunidad de poder estudiar lo que de verdad me gusta sin ningún tipo de restricción, dándome tanto el apoyo anímico como el económico que necesitaba para lograrlo.

A Marta, porque aquellos que conocen tu día a día son los que aguantan tus peores momentos y porque a veces en la vida se necesitan personas que confíen en ti más que tú mismo, gracias.

Mentiría si dijera que no me acuerdo de mis abuelos, algunos ya no están, pero tengo recuerdos que los mantienen vivos. “Simplemente no puedes superar a la persona que nunca se rinde”¹ y ellos nunca se rindieron.

A mis amigos, gracias por estos años en Madrid, sin duda no hubiera sido lo mismo sin ellos. Trabajos, prácticas, fiestas... me llevo un buen recuerdo de todos y estoy seguro de que volveremos a vernos porque hay cosas que hay que repetir. En especial, a Carlos y Miguel, gracias por todos estos años (que ya son 10), donde ha habido muchas complicaciones para todos, pero hemos salido adelante.

Finalmente, quisiera darle las gracias a la persona que ha hecho que este proyecto sea posible, a Marcos Rodríguez. Por todo el esfuerzo y tiempo que ha invertido en este trabajo para que saliera adelante, también por su paciencia.

Y con esto se cierra un ciclo, un período en el que he aprendido muchas cosas, algunas buenas, otras no tanto, pero es una experiencia que sin duda recordaré toda la vida.

¹ Babe Ruth, jugador de béisbol estadounidense, fue introducido en el Salón de la Fama del Béisbol en 1936.

Resumen

En el documento que se expone a continuación se presentan los resultados de una simulación de impacto sobre un bloque de espuma hecha con ABAQUS. Este tipo de ensayo también es conocido como impacto en torre de caída, en la que se imponen las condiciones que definen el movimiento del cuerpo (en este caso se hará por medio de la velocidad).

El fin de este estudio reside en conocer el comportamiento de los diferentes materiales definidos en ABAQUS bajo esas condiciones de impacto, y determinar cuál tendría un mejor comportamiento.

Para ello se han hecho dos clasificaciones: la primera de ellas se realiza suponiendo que se use para proporcionar protección en la cabeza (diseño de un casco), por medio del criterio impuesto por la mayoría de empresas líderes del sector, el HIC (Head Injury Criterion). La segunda clasificación define el material que ofrezca la mejor protección a nivel corporal (diseño de un chaleco) por medio de la energía absorbida.

Un aspecto importante a considerar en este proyecto es el uso de espumas comerciales con especificaciones perfectamente definidas por el fabricante para la realización de la simulación, con el objetivo de dar unos resultados lo más cercanos a la realidad posible. Esto se debe a que los materiales “de laboratorio” como puede ser el poliuretano, son un poco utópicos, es decir, a nivel de mercado es muy difícil conseguirlo en estado puro, además de poseer un comportamiento peor que el de las espumas diseñadas especialmente para impactos y absorción de energía.

Palabras clave: Espuma; HIC; Absorción de energía; Límite elástico; Zona valle; Endurecimiento; Simulación.

Abstract

In this document are shown the results of an impact on a block of foam simulated with ABAQUS. This type of test is also known as drop tower impact where the conditions that define the body movement are imposed (in this case will be done by the speed).

The purpose of this study aims to know the behavior of the materials defined in ABAQUS in specific conditions, and determine which would have a better performance.

The solution has two classifications: the first one is done assuming that is used to provide head protection (design of a helmet), using the same criteria that companies in the sector, the HIC (Head Injury Criterion). The second classification defines the material that provides the best protection at body level (design of a vest) by the absorbed energy.

An important aspect to consider in this project is the use of commercial foams with specifications defined by the manufacturer to carry out the simulation, in order to give a real solution. This is because the "laboratory materials" such as polyurethane is very difficult to achieve in a pure state, besides having a worse behavior than foams designed especially to impacts and energy absorption.

Keywords: Foam; HIC; Energy absorption; Yield limit; Valley area; Hardening; Simulation.

ÍNDICE

1. Introducción	6
1.1. Motivación	6
1.2. Objetivos	6
1.3. Fases del desarrollo y medios empleados.....	7
1.4. Estructura de la memoria.....	7
2. Antecedentes	9
2.1. Introducción	9
2.2. Espumas	10
2.2.1. Propiedades Mecánicas.....	11
2.3. Clasificación de las espumas.	11
2.4. Formación de espumas	13
2.4.1. Poliuretano.....	14
2.5. Ensayos.....	15
2.6. Comportamiento mecánico	17
2.6.1. Comportamiento del aire.....	19
2.7. Espumas actuales	20
2.8. Otros componentes usados actualmente en protección.....	23
2.9. Criterio de lesión en la cabeza.	24
2.9.1. Ventajas de la aceleración en pico.....	26
3. Descripción de materiales en ABAQUS	28
3.1. Hyperelastic, función de energía.....	29
3.1.1. Ogden	29
3.1.2. Van der Waals	30
3.1.3. Marlow	31
3.1.4. Mooney-Rivlin	32
3.1.5. Neo-Hookean	32
3.2. Otros.....	33
4. Análisis experimental y simulación numérica	34
4.1. Introducción	34
4.2. Material	34
4.2.1. Modelo viscoelástico.....	35

4.2.2. Modelo “hyperfoam”	36
4.2.3. Enfoques de viscoelasticidad en ABAQUS.....	37
4.3. Compresión cíclica de una espuma de poliuretano virgen y otra remodelada	38
4.4. Modelo numérico de compresión de espumas.....	40
4.5. Modificaciones aplicadas al modelo numérico	44
5. Materiales empleados.....	46
5.1. Airex	46
5.1.1. Airex 82.60	47
5.1.2. Airex 82.80	48
5.2. Corcho aglomerado	49
5.3. Riddell.....	51
5.3.1. Riddell Soft	52
5.3.2. Riddell Hard	53
5.4. Rohacell	54
5.5. Oregon.....	55
5.6. Team Wendy	57
5.6.1. Team Wendy Soft	58
5.6.2. Team Wendy Hard.....	58
6. Resultados	60
6.1. Análisis de la sensibilidad de mallado.	60
6.2. HIC (HEAD INJURY CRITERION).....	63
6.2.1. Airex	63
6.2.2. Corcho Aglomerado	66
6.2.3. Riddell.....	67
6.2.4. Rohacell	70
6.2.5. Oregon.....	71
6.2.6. Team Wendy	73
6.2.7. Comparación de resultados con las curvas	75
6.3. Absorción de energía	77
6.3.1. Airex	78
6.3.2. Corcho aglomerado	80
6.3.3. Riddell.....	80
6.3.4. Rohacell	82
6.3.5. Oregon.....	83
6.3.6. Team Wendy	84
6.3.7. Comparación de resultados con las curvas	86



7. Conclusiones.....	88
7.1. Desarrollos futuros.....	89
8. Bibliografía.	90



Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Representación de un cuerpo de espuma diferenciándose la zona sólida de las perforaciones.....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 2. Imagen de una espuma de celda cerrada</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 3. Grupos funcionales que componen la estructura principal del poliuretano</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 4. Formación de la espuma de poliuretano por medio de un proceso químico</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 5. Máquina de compresión usada para ensayar las espumas</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 6. Máquina de ensayo a flexión para el ensayo de espumas.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 7. Torre de caída libre para el ensayo de espumas.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 8. Máquina para impactos a altas velocidades</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 9. Ensayo de compresión</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 10. Grafico que define el comportamiento de las espumas.....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 11. Algunas espumas comerciales utilizadas en protección</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 12. Densidades de las principales espumas comerciales de protección</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 13. Espumas de la empresa Paracell.....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 14. Espumas de la empresa Poron.....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 15. Almohadillas y casco de combate de la empresa Oregon.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 16. Tipos de tejidos: a)Tafetán b)Sarga c)Satén d)Esterilla</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 17. Comparación de picos de aceleración con y sin filtro</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 18. Elementos viscoelásticos de Maxwell en paralelo</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 19. Datos del poliuretano</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 20. Resultados obtenidos para el poliuretano</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 21. Parámetros hiperelásticos del poliuretano</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 22. Máquina de compresión Instron utilizada por Mills en sus ensayos.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 23. Espuma de poliuretano virgen</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 24. Espuma de poliuretano remodelada.....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 25. Histéresis de cada material en los ensayos realizados por Mills</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 26. Esquema de ensayo numérico realizado por Mills.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 27. Secuencia de pandeo en el caso de no delimitar el movimiento de compresión</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 28. Resultado de la simulación de compresión de la espuma.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 29. Estructura química de la Polieterimida</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 30. Propiedades mecánicas de la espuma Airex 82.60</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 31. Espuma Airex 82.60 gráfica tensión-deformación.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 32. Propiedades mecánicas de la espuma Airex 82.80</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 33. Espuma Airex 82.80 gráfica tensión-deformación.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 34. Corcho aglomerado</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 35. Propiedades mecánicas del corcho aglomerado.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 36. Gráfica tensión-deformación del corcho aglomerado</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 37. Espuma Riddell en cascos de protección.....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 38. Riddell Soft gráfica tensión-deformación.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 39. Espuma Riddell Hard gráfica tensión-deformación</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 40. Estructura polimetacrilimida</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 41. Espuma Rohacell.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 42. Espuma Rohacell gráfica tensión-deformación</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 43. Espuma Oregon</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 44. Espuma Oregon gráfica tensión-deformación</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 45. Espumas Team Wendy en un casco de protección</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 46. Espuma Team Wendy Soft gráfica tensión-deformación.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 47. Espuma Team Wendy Hard gráfica tensión-deformación.</i>	<i>59</i>

<i>Ilustración 49. Resultados de la fuerza con un mallado de 2mm</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 48. Solución dada con mallado de 2mm</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 51. Solución dada con un mallado de 4mm</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 50. Resultados de la fuerza con un mallado de 4mm</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 52. Resultados de la fuerza con un mallado de 8mm</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 53. Solución dada con un mallado de 8mm</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 54. Tabla resumen de las soluciones del mallado.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 55. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Airex 82.60</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 56. Curva del HIC producida por la espuma Airex 82.60.....</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 57. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Airex 82.80</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 58. Curva del HIC producida por la espuma Airex 82.80.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 59. Curva de resultados de la aceleración del corcho aglomerado</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 60. Curva del HIC producida por el corcho aglomerado</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 61. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Riddell Soft.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 62. Curva del HIC producida por la espuma Riddell Soft.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 63. A Curva de resultados de la aceleración de la espuma Riddell Hard</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 64. Curva del HIC producida por la espuma Riddell Hard</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 65. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Rohacell</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 66. Curva del HIC producida por la espuma Rohacell</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 68. Curva del HIC producida por la espuma Oregon.....</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 67. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Oregon</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 69. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Team Wendy Soft.....</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 70. Curva del HIC producida por la espuma Team Wendy Soft</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 71. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Team Wendy Hard</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 72. Curva del HIC producida por la espuma Team Wendy Hard</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 73. Gráfico de comparación entre los materiales empleados</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 74. Clasificación según el HIC generado por cada material.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 75. Estado inicial del segundo ensayo</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 76. Estado final (en t=0.02) del segundo ensayo</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 77. Energía absorbida por la espuma Airex 82.60</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 78. Energía absorbida por la espuma Airex 82.80</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 79. Energía absorbida por el corcho aglomerado.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 80. Energía absorbida por la espuma Riddell Soft</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 81. Energía absorbida por la espuma Riddell Hard.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 82. Energía absorbida por la espuma Rohacell.....</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 83. Energía absorbida por la espuma Oregon</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 84. Energía absorbida por la espuma Team Wendy Soft.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 85. Energía absorbida por la espuma Team Wendy Hard</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 86. Comparación de energía absorbida de cada material ensayado</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 87. Clasificación de los materiales en función de la energía absorbida.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 88. Porcentaje del HIC usado de cada material en el ensayo</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 89. Porcentaje de energía absorbida por cada material en el ensayo.....</i>	<i>89</i>

1. Introducción

A día de hoy, los programas de elementos finitos como pueden ser ABAQUS, CATIA, SOLIDWORKS... facilitan mucho el diseño de nuevos productos. Antiguamente, el único método de pruebas, a parte de los cálculos numéricos, era el ensayo de un prototipo del producto en cuestión.

1.1. Motivación

Con las herramientas de cómputo actuales es posible realizar una simulación de la que se obtiene una referencia del comportamiento descrito, no solo a nivel numérico (tensiones, fuerzas, aceleraciones...) sino también a nivel visual.

En la otra cara de la moneda se encuentra el reto que presenta el mundo de la protección, ya sea de la cabeza o de cualquier otra parte del cuerpo. Este tipo de estudios han salvado la vida de muchas personas y no cabe duda que es uno de los campos de la ingeniería donde las innovaciones no se detienen.

Debido al complejo comportamiento de las espumas y la incertidumbre que genera su utilización (ya que no sólo se opera en la parte elástica), se ha optado por este tipo de análisis de elementos finitos, ya que, a priori, sólo con las curvas características, no se sabe cuál tendrá un mejor comportamiento. Esto hace pensar que depende directamente de las condiciones de contorno impuestas en cada situación.

1.2. Objetivos

El objetivo del proyecto es obtener una serie de datos que permitan determinar, claramente, qué material de los empleados se comporta mejor en cada situación. Dando:

- Una clasificación según el **HIC**. De este modo se puede ver con qué material de los analizados se obtiene un menor riesgo de lesión en la cabeza frente a un impacto (protecciones para cascos).
- Una clasificación según la **energía absorbida**. En este caso, se presenta una clasificación para un amplio abanico de protecciones, en general, la protección corporal. Exponiendo claramente qué material absorbe más energía en el caso de que impacte un cuerpo contra él.

1.3. Fases del desarrollo y medios empleados

En primer lugar, se introducen los parámetros que definen el comportamiento de cada material. Para ello se hace uso de las curvas tensión-deformación descritas por cada espuma en ensayos experimentales.

Posteriormente se definen las condiciones del ensayo, parámetros como velocidad de impacto, masa, volumen y condiciones de contorno entre otros.

A continuación, se lanzará la simulación obteniendo los diferentes datos aportados por el programa de elementos finitos ABAQUS. En el caso de análisis del HIC, el principal parámetro a analizar es el espectro de aceleración de la placa de impacto, que sería la que sufriría la cabeza en el caso real. Para protecciones corporales, sin embargo, tendrá mucho más peso la energía absorbida por el material.

Para la realización de este proyecto, a parte de la información referenciada en la bibliografía, se ha hecho uso del programa de simulación numérica ABAQUS.

1.4. Estructura de la memoria

La realización de este proyecto estriba en 7 partes principalmente:

- **Antecedentes.** En este capítulo se explicará toda la información relevante que tenga relación con este proyecto, tratando temas como: propiedades de las espumas, proceso de formación de las mismas, tipos de ensayos, algunos tipos de espumas de protección utilizadas a día de hoy y definición del Head Injury Criterion entre otros.
- **Descripción de materiales en ABAQUS.** En esta segunda parte se citarán algunas formas de definir los materiales en el programa de simulación. La elección del proceso dependerá de la cantidad y variedad de los datos obtenidos.
- **Análisis experimental y simulación numérica.** El tercer capítulo de la memoria trata sobre el ensayo de partida y se explica cómo simularlo para así obtener unos

resultados que sean coherentes con el ensayo real. Además, se hablará de las modificaciones aplicadas para que se ajuste al objetivo de este proyecto.

- **Materiales empleados.** Seguidamente se hará una breve descripción de los materiales empleados acompañados de sus curvas características.
- **Resultados.** Esta es, quizás, la parte más importante del proyecto donde se conocen los resultados de cada material y se puede ver su comportamiento en las condiciones descritas.
- **Conclusiones.** Se tratarán las consecuencias de esos resultados, contrastándolos con los datos obtenidos inicialmente (curvas características, densidad...).

2. Antecedentes

2.1. Introducción

Para el análisis de protecciones ligeras compuestas de espumas balísticas, es necesario conocer el comportamiento de estas espumas frente a cargas dinámicas. De esta manera se puede obtener una correcta simulación de las mismas. Estas simulaciones darán unos datos que serán la piedra angular del estudio para poder obtener una interpretación de ellos.

En primer lugar, se hará un análisis del tipo de material que se empleará para el ensayo. Se nombrarán las características y propiedades mecánicas por las que se ha elegido este tipo de material.

En segundo lugar, se tratarán los procesos de clasificación según qué parámetros se tengan en cuenta. Dependiendo de la finalidad del material, cobrará más importancia un proceso de clasificación u otro. Por ejemplo, se necesitará un criterio distinto para aislar térmicamente que para un ensayo de absorción de energía.

El proceso general de formación de estas espumas se tratará en tercer lugar. En él se describirá el proceso general a nivel de reacciones químicas, tratando más concretamente el caso del poliuretano.

En cuarto lugar, se presentan los ensayos que se pueden realizar para medir las propiedades y el comportamiento de estas espumas.

En la quinta parte se explicará más detenidamente el comportamiento de estas espumas; es decir porqué lo hacen de esa manera y como se sucede el proceso de absorción de energía. Además, se tratará la importancia del comportamiento del aire en algunas almohadillas.

En sexto y séptimo lugar, se nombrarán algunos materiales utilizados actualmente en sistemas de protección personal. Más concretamente de espumas de protección tanto balísticas como deportivas y otro tipo de protecciones avanzadas como el Kevlar.

Para finalizar, se explicará cómo se cuantifican los daños ejercidos por los impactos en el caso de que sucedieran en la cabeza. La herramienta para hacerlo se conoce como el HIC y se calcula en función de la aceleración.

2.2. Espumas

A día de hoy las espumas son usadas en numerosos campos, ya que tienen como principales características una densidad baja (entre 50 y 200 Kg/m³) y una gran capacidad de absorción de energía, en comparación con metales como el acero.

Cuando en una sustancia, líquida o sólida, quedan atrapadas importantes burbujas de un gas se puede decir que se trata de una espuma. Esta es la principal característica por la cual son elementos de baja masa, y es que una gran cantidad del volumen está ocupada solamente por aire.

Con respecto a lo anterior, se puede definir una clasificación según la composición de gas/líquido y gas/sólido (Gibson y Ashby 1997):

- Espuma líquida. Se conoce como espuma líquida a aquellas cuyas burbujas de gas se encuentren en la superficie del líquido.
- Burbuja de emulsión. A diferencia del caso anterior, en este tipo de espumas las burbujas de gas se dispersan en todo el volumen del líquido.
- Líquido de emulsión. Este tipo de espumas guarda cierta relación con el anterior con una salvedad, y es que, en lugar de tratarse de burbujas de gas, se hacen con burbujas de líquido.
- Gelación. En este caso las burbujas se encuentran sumergidas en un cuerpo sólido. La composición de las burbujas debe ser de un material líquido.
- Espuma. Este será el tipo de material a tratar y se define como la inclusión de burbujas de gas en un cuerpo en estado sólido.

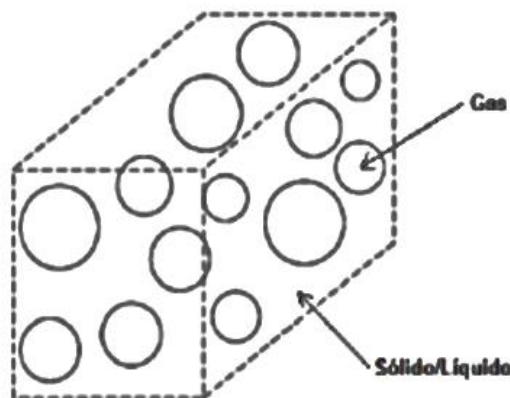


Ilustración 1. Representación de un cuerpo de espuma diferenciándose la zona sólida de las perforaciones

Debido a las características que presenta este tipo de material, las aplicaciones son muy diversas:

- Natural. Piedra pómez, tronco de árbol, madera, corcho, organismos...

- Sintética.
 - Plásticos. Cojín de asiento, chaleco salvavidas, tabla de aislamiento...
 - Automotriz. Apoya brazos, parachoques...
 - Deportivo. Relleno de casco, protección de rodilla, tabla de surf...

2.2.1. Propiedades Mecánicas

Las espumas poliméricas son materiales clave en múltiples aplicaciones. La mayor parte de ellas se utilizan en mercados que aprovechan sus propiedades como aislantes y sus características mecánicas.

Y de esta manera conseguir un alto grado de aislamiento térmico en estos materiales, garantizando simultáneamente la seguridad en condiciones extremas, requisito de gran importancia en sectores como la construcción, la automoción, la aeronáutica o el envasado.

Las principales características por las que se debería usar una espuma son:

- Rigidez
- Resistencia al impacto
- Resistencia dieléctrica y térmica
- Permeabilidad
- Capacidad de absorber energía
- Ligereza
- Aislante sonoro
- Elasticidad

Los distintos parámetros se podrán encontrar en mayor o en menor medida en función del tipo de espuma. Debido a que hay una amplia variedad, pueden existir grandes diferencias entre ellos. Como norma general se puede usar la lista anterior.

2.3. Clasificación de las espumas.

Dependiendo de cómo se pretenda clasificar este tipo de material, existen dos principales grupos (Gibson y Ashby 1997):

- **Según la morfología de la celda**
 - Abierta. Son las mejores para muelles y colchones de aislamiento acústico, entre otros usos, y son principalmente flexibles. Este tipo de estructura posee otra peculiaridad y es que posee túneles entre las celdas.

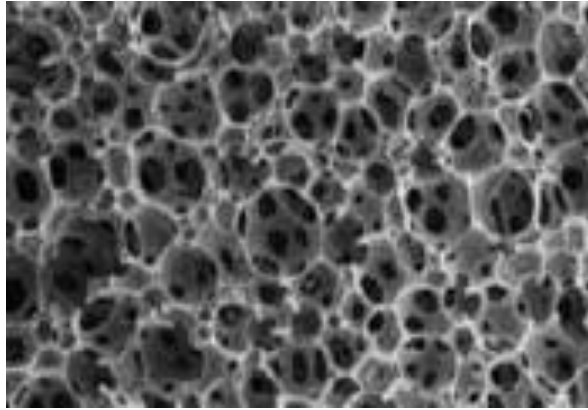


Ilustración 2. Imagen de una espuma de celda abierta

- Cerrada. Son espumas que tienen características más relacionadas con el aislamiento térmico y son generalmente rígidas. Esta vez a diferencia del caso anterior, se tiene una estructura que no conecta unas burbujas con otras.

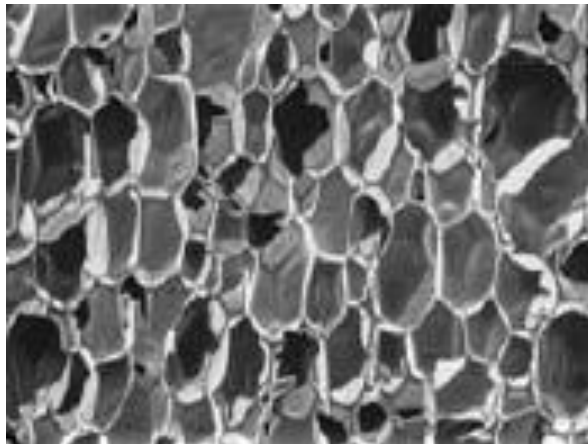


Ilustración 2. Imagen de una espuma de celda cerrada

- **Según su temperatura de transición vítrea.**

Esta segunda clasificación tiene como objetivo analizar la temperatura característica de los polímeros (temperatura de transición vítrea), diferenciando si esta se encuentra por debajo o por encima de la temperatura ambiente.

Esta temperatura, depende a su vez, de la composición química del elemento y por supuesto del grado de cristalinidad y entrecruzamiento de las moléculas.

Se pueden diferenciar entre:

- Flexibles
- Semiflexibles
- Semirrígidas
- Rígidas

La matriz polimérica, la estructura de la celda, y la composición del gas son las propiedades de las que dependen las características físicas, mecánicas y térmicas («How to Identify Plastic Materials Using The Burn Test», s. f.). Se dice que la estructura de un compuesto está formada naturalmente cuando la fase gaseosa se dispersa de forma esférica en el interior de una matriz polimérica. Las propiedades de este tipo de compuestos son determinadas por sus constituyentes y sus distribuciones.

Dado que el peso del gas en el interior de la espuma es despreciable, las propiedades del conjunto gas/polímero a menudo dependen de forma volumétrica de los componentes participantes. De este modo, la densidad sería un claro ejemplo en una zona de burbujas, ya que es una propiedad que depende directamente del volumen.

Otras en cambio, no poseen esta característica y distribuyen las propiedades cualitativamente, es el caso de las propiedades termodinámicas, el calor específico o la conductividad térmica que dependen de la proporción de masa de cada elemento que componen la espuma.

Los siguientes parámetros estructurales son los que determinan principalmente las características de las espumas poliméricas:

- Densidad de la celda
- Coeficiente de expansión
- Distribución del tamaño de la celda
- Contenido de la celda abierta e integralidad de celda

Todos estos parámetros dependen del espumado usado mientras se procesa el material. Éste espumado depende de la tecnología utilizada además del tipo de polímero utilizado.

Cada espuma tiene sus propiedades que le hace ser diferente al resto, unas pueden ser con un módulo de Young bajo o alto, con un comportamiento flexible o uno totalmente duro, de histéresis baja o alta, de una distribución de celda única o una multimodal...

2.4. Formación de espumas

Como ya se ha dicho anteriormente, las espumas están compuestas por materiales poliméricos y un gas. A la hora de generar este efecto se puede hacer tanto física, como químicamente (Sivertsen 2007).

Si se opta por hacerlo químicamente, es necesario recurrir a los agentes de soplado químico. Éstas son sustancias que participan en una reacción o se descomponen, dando lugar a gases generados por alguno de estos procesos.

En cambio, para hacerlo físicamente, es necesario recurrir a otras máquinas que aporten el gas requerido para la formación de la espuma (ya sean gases específicos, en el caso de que sea espumas de matriz cerrada, o aire, en el caso de que sean abiertas).

Mediante el proceso de síntesis de la espuma, se somete el material a flujos de aire generando así las cavidades del cuerpo resultante.

Las espumas de polímero se pueden dividir, principalmente, en termoplásticos o termoestables, que a su vez se puede subdividir en espumas rígidas o flexibles. Los termoplásticos, generalmente se pueden reciclar, mientras que en los termoestables es más difícil conseguir llevar a cabo este proceso. Esto es debido a que, por lo general, tienen una estructura muy reticulada.

2.4.1. Poliuretano

La mayoría de espumas, tienen como base el poliuretano o en su defecto, una estructura similar. En concreto, este material está compuesto por dos grupos funcionales principales denominados: diisocianato y diol (Sivertsen 2007).

La carga positiva debido a la electronegatividad del oxígeno, hace que el hidrógeno quiera unirse a un núcleo. El nitrógeno dará su carga negativa al átomo de hidrógeno en el grupo alcohol y se formará un enlace de uretano entre las dos unidades del monómero. De esta forma, cada extremo del grupo puede reaccionar con otros monómeros, formando el poliuretano.

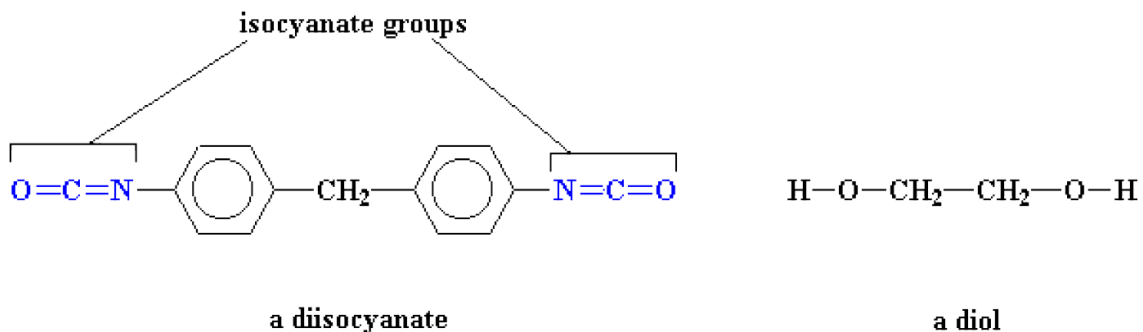


Ilustración 3. Grupos funcionales que componen la estructura principal del poliuretano

La diferencia entre la fabricación del poliuretano y espuma de poliuretano, es que un gas tiene que ser incorporado en el producto final. Para elaborar esto, el grupo isocianato se hace reaccionar con agua, lo que da lugar a la formación de una amina y gas. Debido a que el grupo isocianato se convierte en una amina, la reacción con otros diisocianatos hace que se produzcan vínculos de urea en la espuma de poliuretano. Este fenómeno no influye en las propiedades del material base (poliuretano).

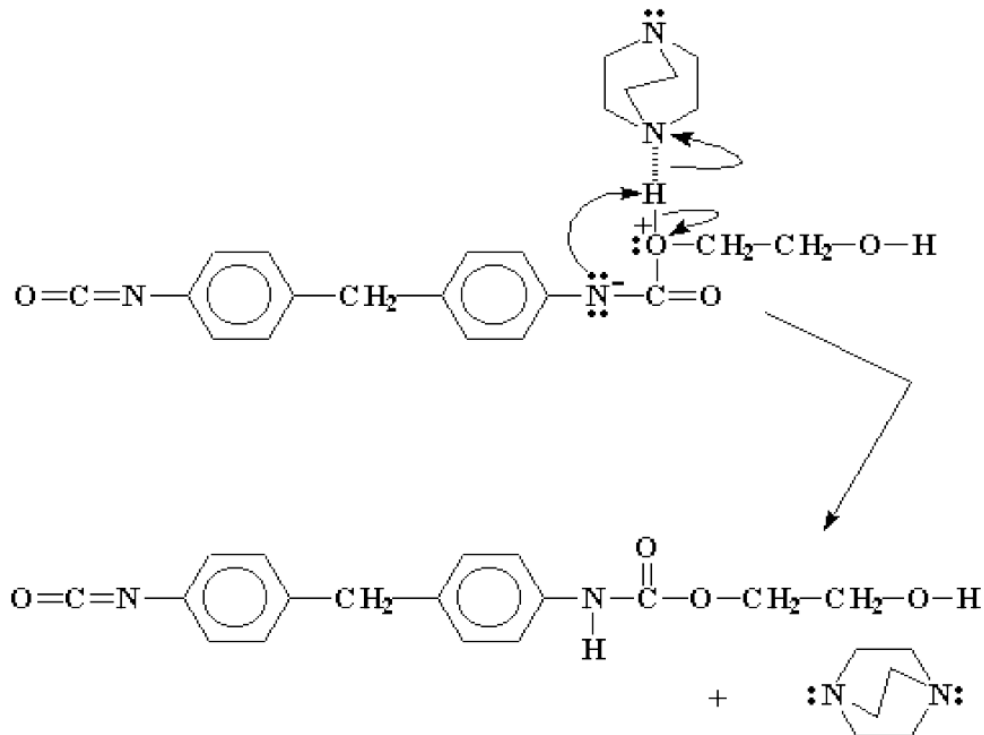


Ilustración 4. Formación de la espuma de poliuretano por medio de un proceso químico

2.5. Ensayos

Para definir estas propiedades mecánicas es necesario recurrir a ensayos de caracterización mecánica convencionales:

- **Compresión.** Este ensayo es bastante común no sólo en el análisis de espumas sino también en la caracterización de cualquier material del que se quieran conocer sus propiedades.



Ilustración 5. Máquina de compresión usada para ensayar las espumas

El ensayo consiste en colocar una probeta de sección constante (ya sea cuadrada o circular) y comprimirla a una velocidad nominal constante, hasta el fallo de la probeta o hasta que la deformación alcance un valor tope.

- **Flexión.** Al igual que el test anterior, esta prueba se usa también en otro tipo de materiales para estimar su resistencia. Ésta consiste en colocar una probeta de sección rectangular constante, sometida a tres o cuatro puntos de flexión, hasta el fallo de la misma.

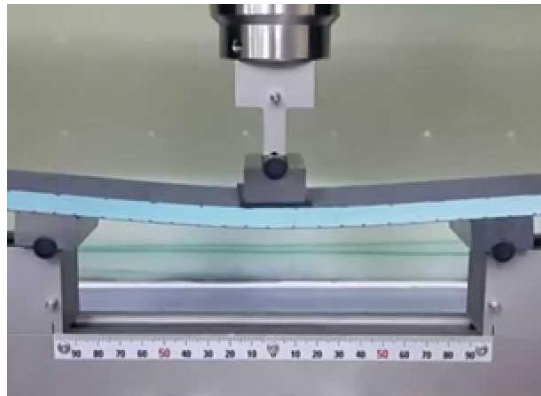


Ilustración 6. Máquina de ensayo a flexión para el ensayo de espumas

- **Impacto en torre de caída.** Este ensayo es más característico de materiales absorbentes de energía. Su realización consiste en una placa sujeta a una plataforma, en esta placa impacta un dardo en caída equipado con una celda de carga y un transductor de desplazamiento. Como condición se debe imponer que el impacto genere el fallo de la muestra.



Ilustración 7. Torre de caída libre para el ensayo de espumas

- **Impacto a alta velocidad.** Este ensayo al igual que el anterior se utiliza principalmente para ver cuanta energía es capaz de absorber el material, para ello se hace impactar un objeto plano a alta velocidad hasta el fallo de la probeta.



Ilustración 8. Máquina para impactos a altas velocidades

Cabe destacar que para conocer las propiedades de los elementos es necesario conocer su comportamiento tanto a altas como a bajas velocidades de deformación. Además, las espumas que posean más de un componente se debe analizar tanto individualmente como todo en su conjunto. De esta manera se obtiene una mejor aproximación de cómo reaccionará el material frente a impactos.

2.6. Comportamiento mecánico

Se puede decir que todas las espumas tienen un comportamiento a compresión que les caracteriza. Como se muestra representada en la ilustración 10, se puede ver que se presenta una fuerza a compresión definida gráficamente como una función de compresión (W. C. Moss, King, y Blackman 2014). El área bajo esta curva da lugar a la energía de impacto absorbida por la espuma.

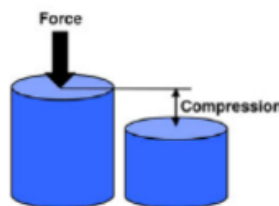


Ilustración 9. Ensayo de compresión

Después de un comportamiento elástico lineal muy corto, las paredes celulares de la espuma comienzan a curvarse (produciéndose lo que se conoce como efecto barril) y la espuma continúa comprimiéndose bajo una carga constante. Cuando la espuma densifica (la espuma al disminuir el volumen y teniendo la misma masa, se comprime

hasta tal punto en el que las cavidades interiores se colapsan por completo), la fuerza requerida para seguir comprimiendo aumenta considerablemente.

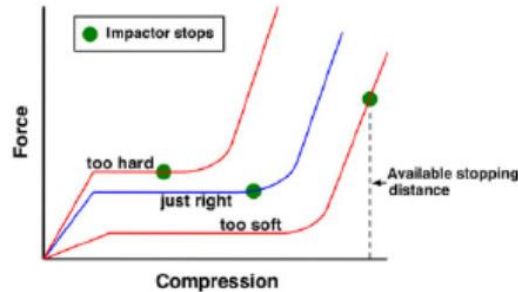


Ilustración 10. Grafico que define el comportamiento de las espumas.

Como el elemento parará en el punto verde, se hará la integral de la función hasta ese punto, lo que dará la energía absorbida por el material.

Esta situación demuestra porque la espuma es adecuada para protección sólo contra impactos. Una espuma con un proceso de densificación en una zona alta del gráfico tensión-deformación, disipará toda la energía del impacto sin densificar. Sin embargo, lo hace mediante una fuerza más grande de la que se necesita, no estando así la espuma totalmente optimizada y obteniendo unas desaceleraciones bastante altas.

Un tipo de espuma más suave con la parada del proyectil al final de la región horizontal de la curva disipará toda la energía y además con una menor fuerza. Esta progresividad hace que se produzcan desaceleraciones más pequeñas.

Si se presenta, en cambio, una espuma demasiado blanda, puede ser que no sea capaz de absorber la energía que se requiere para detener el proyectil, o si es capaz de absorberla, pero ya ha densificado, por tanto, la fuerza de frenado será grande, produciendo unas desaceleraciones mucho mayores. Pudiendo generar lesiones importantes en la zona de protección.

Cabe destacar que, en realidad, no ocurre exactamente eso. Se conoce que el comportamiento de las espumas puede llegar a ser viscoelástico en algún momento del impacto, de esta manera a medida que la espuma vaya absorbiendo energía, la tensión en la zona horizontal de la curva se irá desplazando hacia arriba.

De este modo es muy complicado definir exactamente una velocidad (ya que a medida que impacta va cambiando su valor) para una determinada geometría, que haga óptimo el espesor de espuma utilizado y que se detenga exactamente en la parte final de la zona horizontal de la curva.

En general, el dimensionamiento de la espuma se hará para un amplio rango de energías, pudiéndose así despreciar este fenómeno.

De este modo se puede concluir con que, para un determinado espesor, existe una única espuma que se acerque al comportamiento óptimo frente a un impacto. Como en las condiciones habituales no se conoce exactamente la energía que va a tener que disipar, se colocan en serie varias clases de espumas.

Así, se crea lo que se conoce como almohadillas de múltiples capas, y es bastante efectiva, ya que abarca un amplio rango de absorción de energía. Lo que hace que la almohadilla no esté limitada a un determinado valor de absorción, sino que haya un amplio margen de seguridad.

El funcionamiento de una espuma multicapa es bastante sencillo. Si una espuma blanda se superpone a una espuma rígida, la primera de éstas absorberá toda la energía del impacto si el impacto no es demasiado severo, haciendo que la espuma dura prácticamente no se deforme, y se detenga con una fuerza relativamente baja (bajas aceleraciones). En cambio, si el impacto se produce con una mayor energía, la espuma blanda se densifica frenando el proyectil, siendo la energía restante absorbida por la zona más dura de la espuma multicapa.

En general, esto se traduce en un mejor comportamiento del cuerpo, es decir, una menor fuerza y aceleración en el momento del impacto, en comparación con un cuerpo monoespuma. Ya que el proceso de densificación se produce en dos fases y de manera progresiva en una almohadilla multicapa.

2.6.1. Comportamiento del aire

A continuación, se describirá el comportamiento del aire en el caso de que no sea despreciable, como es el caso de las espumas Team Wendy y Oregon Aero (W. Moss y King 2011).

El aire a menudo es modelado como un material sin resistencia a la cizalladura y con una respuesta volumétrica de compresión o expansión adiabática gobernada por la siguiente expresión:

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma \quad (2.1)$$

Donde p y V son la presión y el volumen, y γ es la relación de calor específica.

Cuando $V_0 = 1$,

$$p = \frac{p_0}{V^\gamma} \quad (2.2)$$

Aunque se espera que la compresión lenta de las almohadillas sea aproximadamente un proceso adiabático, esta ecuación de estado no es apropiada para la representación del comportamiento del aire por dos razones: en primer lugar, el aire tiene

un volumen mayor ya que la almohadilla se rellena con espuma; y, en segundo lugar, si se aplicara deformación nula sale un valor distinto a cero (p =presión atmosférica).

Como resultado, se necesita una versión modificada de la ecuación anterior, que satisfaga las condiciones de contorno apropiadas:

$$p = \alpha p_0 \left(\frac{1}{V^\gamma} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Esta ecuación producirá presión (por tanto, también tensión) cero, cuando la deformación sea cero. Además, se ha añadido un parámetro α , el cual está comprendido entre 0 y 1, y representa el hecho de que el volumen atrapado en la cubierta de la almohadilla es menor que el volumen total de la almohadilla. Viéndole el sentido físico, podría verse como una medida de porosidad de la almohadilla, siendo éste característico de cada espuma.

2.7. Espumas actuales

A día de hoy, muchos investigadores intentan conocer el comportamiento de las espumas frente a estos impactos, más concretamente su comportamiento a compresión.



Ilustración 11. Algunas espumas comerciales utilizadas en protección

Un ejemplo de ello es el artículo publicado por Wensu (Chen et al. 2015), en él, el autor investiga sobre el comportamiento de diferentes materiales a compresión. Sin embargo, no se hace un análisis del comportamiento de estos materiales en cascos de combate.

En la ilustración 11 se aprecian algunas de las espumas más importantes que se utilizan en la industria de los cascos de protección (W. C. Moss, King, y Blackman 2014),

ya sean protección militar como puede ser Team Wendy, Oregon Aero, Riddell ... o cascos de fútbol americano, como es la empresa Xenith.

En el caso anterior, las 4 marcas presentan almohadillas multicapas, en este caso concreto hacen uso de dos capas de espumas cada una.

	Capa blanda (Kg/m ³)	Capa dura (Kg/m ³)
Team Wendy	54.6	55.2
Oregon Aero	86.9	89.6
Riddell	66.9	97.7

Ilustración 12. Densidades de las principales espumas comerciales de protección

La espuma Team Wendy se caracteriza por ser una espuma de doble capa y por encontrarse en contacto por una tela polimérica impermeable al igual que las espumas Oregon Aero.

Sin embargo, las espumas Riddell se disponen en el interior de una carcasa inflable con canales de aire que conectan unas almohadillas con otras.

Las espumas Xenith son también espumas multicapa (formado por dos espumas). La primera de ellas se trata de una espuma de baja densidad con muchos orificios (la mayoría del volumen está ocupado por aire) con un comportamiento elástico, acompañada de un cojín de espuma de poco espesor para ofrecer una mayor comodidad con sus productos.

El hecho de que las espumas estén atrapadas en un recubrimiento que proteja del agua, como es el caso de las espumas Wendy Team y Oregon Aero, afecta al comportamiento de la espuma frente a impactos. Por tanto, se debe tener en cuenta si se van a hacer predicciones sobre su comportamiento.

El tipo de espuma Riddell, sin embargo, a pesar de que tiene un recubrimiento para impermeabilizar la espuma, ésta no afecta al comportamiento mecánico de la misma siempre y cuando la velocidad del impacto no supere los 6 m/s, ya sea preinflado o no. La explicación a este fenómeno reside en los canales de socorro que existen entre las almohadillas adyacentes, que hace que el aire comprimido como resultante de un impacto fluya de una almohadilla a otra. Si esta velocidad de impacto es muy grande, los canales de socorro no son capaces de evacuar suficiente caudal de aire lo que hace que afecte a su comportamiento mecánico.

Para comprobar el funcionamiento de estas espumas multicapas, se han ensayado también con algunas otras marcas comerciales, y determinar así su eficacia ante un impacto. De esta manera se puede predecir la probabilidad de generar un daño cerebral con protecciones como las que se muestran a continuación:

- Peracell. Empresa americana que abarca el campo de fabricación en piezas de todo tipo de polímeros ya sean elastómeros, espumas plásticas, plásticos...
Además, esta empresa ofrece maquinaria para la transformación de todo tipo de materiales.



Ilustración 13. Espumas de la empresa Paracell

- Poron. Es una empresa internacional que trata todo tipo de productos de protección ya sea de trabajo o de deporte. Su idea es centrarse en la fabricación de nuevos materiales para conseguir comodidad y amortiguación de alto rendimiento.

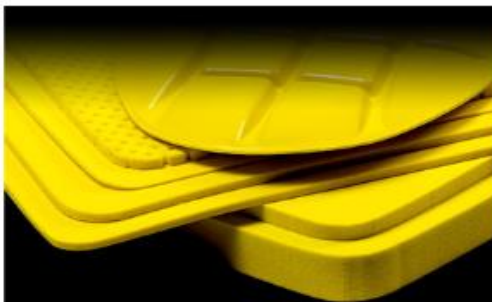


Ilustración 14. Espumas de la empresa Poron

- Oregon Aero. Ya se ha hablado de las espumas de esta empresa, pero se puede decir que, dentro del ámbito militar, están dedicados, además de la fabricación de cascos de combate, al confort en los sectores de la aviación.



Ilustración 15. Almohadillas y casco de combate de la empresa Oregon

2.8. Otros componentes usados actualmente en protección.

Además de las espumas, se están utilizando cada vez más compuestos con fibras de altas prestaciones en el ámbito de la protección personal (Rodríguez 2011). Estos materiales también gozan de una baja densidad si se comparan con el acero o con cualquier otro elemento metálico. Sin embargo, su densidad es entre cinco y diez veces superior a la de las espumas.

Este tipo de fibras en vez de centrarse en la absorción de energía lo que busca es una maximización de la resistencia y modulo elástico, de este modo se puede decir que se trata de unos materiales destinados a velocidades de impacto mucho mayores que las espumas anteriormente citadas.

Existen dos enfoques en la fabricación de este tipo de fibras: por un lado, se forman cadenas rígidas de polímero altamente orientadas y con un peso molecular relativamente bajo. Y por el otro, se encuentra la generación de largas cadenas flexibles de alto peso molecular orientadas al azar.

Comúnmente en este tipo de materiales sufren el desprendimiento de fibras por abrasión normalmente en la superficie del compuesto, haciendo que disminuya su resistencia con el paso del tiempo.

Al tratarse de un material compuesto, la orientación de las fibras tiene un importante peso en el comportamiento del material. Estudios sobre los tipos de tejido sugieren que las estructuras con un menor entrelazado son capaces de propagar de forma más eficiente las ondas de deformación en las fibras. Se ha averiguado también que los tejidos compuestos de un menor diámetro se comportan mejor que los de uno mayor.

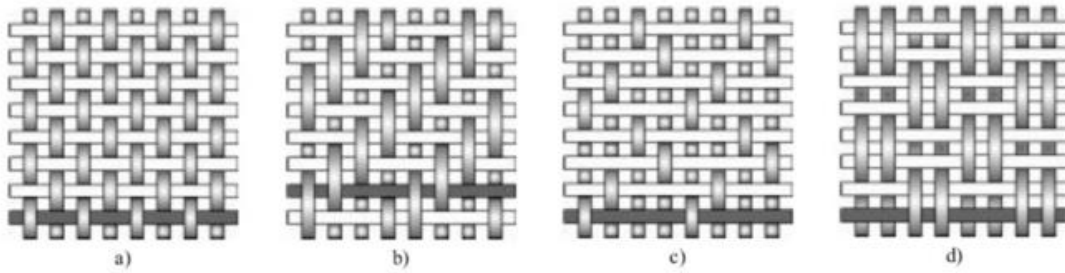


Ilustración 16. Tipos de tejidos: a)Tafetán b)Sarga c)Satén d)Esterilla

Como se puede apreciar en la ilustración 16, se pueden observar varios tipos de tejidos:

- **Tafetán.** Es el tejido más utilizado. La trama se forma alternando en cada cruce arriba y abajo en ambas direcciones. Son tejidos bastante abiertos y facilitan la distribución de la resina al ser utilizados en compuestos. Por otra parte, esta estructura abierta hace que sea necesaria una mayor cantidad de resina para rellenar los huecos.
- **Esterilla.** Su estructura es muy parecida a la anterior, sin embargo, no son cruces de uno a uno sino en grupos de dos. Este tipo de tejido se utiliza en cuerpos de mayor tamaño y mayor espesor.
- **Sarga.** A diferencia del caso anterior el número de fibras que se pasan por encima y por debajo es aleatorio, pero la fibra contigua se desplaza una fibra más arriba o más abajo dando una sensación de mallado de 45°.
- **Satén.** Este tipo de tejido es igual que la sarga, con la salvedad de que se pasan un cierto número de fibras por encima y solo uno por debajo. A mayor número de fibras que pasen por encima mayor será la flexibilidad del cuerpo, por este motivo se suele utilizar para formas complejas.

El otro componente esencial en los tejidos de alto rendimiento son las resinas. Esta resina puede influir aumentando o disminuyendo la absorción de energía del compuesto. Principalmente hay dos tipos: la termoplástica y la termoestable y ambas tienen un comportamiento distinto. En este caso la resina termoplástica es menos rígida.

La tenacidad de las resinas también influye en el comportamiento del material, siendo las frágiles las que experimentan una delaminación instantánea con poco crecimiento.

2.9. Criterio de lesión en la cabeza.

La protección en el cuerpo humano no deja de ser, al fin y al cabo, un problema de resistencia de materiales. Es decir, existe un material o conjunto de materiales (sistema

locomotor: estructura ósea más muscular) que tiene unas determinadas limitaciones, si éstas son superadas, el material falla.

Sin embargo, en la zona de la cabeza, el estudio debe ir un paso más allá y determinar las aceleraciones sufridas por los fluidos craneoencefálicos. De esta manera, es posible que no haya fractura de huesos, pero sí una importante lesión cerebral interna debido al impacto. Para poder cuantificar las posibilidades de lesión en la cabeza se hace uso del HIC.

El criterio de lesión en la cabeza, más comúnmente conocido como Head Injury Criterion (HIC), es una medida establecida y desarrollada a partir de datos experimentales que cuantifica la gravedad de un impacto (W. C. Moss, King, y Blackman 2009; W. C. Moss, King, y Blackman 2014).

Este valor no tiene en cuenta los movimientos que pueda sufrir la cabeza debido al impacto, sino que solamente cuantifica la gravedad de la aceleración lineal con respecto a la probabilidad de lesión.

Este parámetro es utilizado no solo en industrias de protección corporal, sino también en otras como la automovilística, aeronáutica y demás sectores que necesiten obtener una referencia del daño que se podría ocasionar.

El HIC se define como:

$$HIC = \max \left(\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right) \quad (2.4)$$

Donde en la formula anterior la aceleración debe introducirse en G's y el tiempo inicial y final debe introducirse en segundos. Además, los tiempos inicial y final están relacionados mediante un tiempo de delimitación máximo (normalmente 15 milisegundos). De esta forma queda:

$$t_2 \leq t_1 + 0.015 \quad (2.5)$$

En otras palabras, el HIC se calcula en el peor período de tiempo posible (aceleración máxima) con una longitud inferior a 15 milisegundos. Esa aceleración máxima es el promedio de esa magnitud durante ese periodo de tiempo, elevado a 2.5.

De esta manera se puede apreciar que tanto el valor de la aceleración como el tiempo de exposición son importantes. Si se tienen grandes aceleraciones no necesariamente dan como resultado un HIC grande; elevados valores de aceleración de

muy corta duración darán un HIC inferior que valores medios de aceleración con un mayor tiempo de exposición.

Según los estudios realizados, los rangos de HIC siguen la siguiente clasificación:

- **HIC=1000.** A partir de este valor se considera que el impacto es peligroso para la vida del individuo. Teniendo un 18% de probabilidad de sufrir una lesión severa, un 55% de sufrir lesiones graves y una probabilidad del 90% de lesiones moderadas en un adulto medio
- **HIC=600.** Este valor de HIC es considerado el umbral para lesiones moderadas y se corresponde con el 18% de probabilidad de acabar con un daño grave, así como con un 50% de lesiones moderadas.
- **HIC=300.** En este caso, 300 sería el valor umbral para sufrir conmociones cerebrales menores aproximadamente en un 50%.

2.9.1. Ventajas de la aceleración en pico

Al final, el interés de conocer el HIC es comparar el rendimiento de una espuma mediante el pico de aceleración de cada una de ellas (W. C. Moss, King, y Blackman 2009; W. Moss y King 2011). De este modo grandes picos de aceleración en duraciones muy cortas son en realidad menos peligrosas que las aceleraciones de menor valor, pero de una duración más prolongada.

Este pico de aceleración es muy sensible a cambios de condiciones de impacto ya sea en casos experimentales o en casos de simulación como ya demostraron (W. Moss y King 2011).

En ese experimento se llevaron a cabo una serie de simulaciones de un impacto de un proyectil con dos espumas iguales de Team Wendy y como simulación de una cabeza, un cuerpo de 5Kg. Dependiendo de la deformación que sufren las espumas en el punto del impacto, la aceleración pico reportado por la simulación había variado entre 126 y 146G's. Sin embargo, el HIC solo varió de 435 a 440.

De este modo se conoce que la HIC es mucho menos sensible y no tiene en cuenta parámetros que no son importantes del material. Dando así un valor coherente de la gravedad del impacto.

Hay que tener en cuenta también que la aceleración presenta mucho ruido a la hora de medirla (sobre todo cuando se trata de medirla de forma experimental) y es por ello por lo que es necesario filtrarla.

Nuevamente, la aceleración máxima vuelve a tener una fuerte sensibilidad; en este caso, con respecto a la frecuencia con la que se filtre. Como ya demostraron Moss y King, dos experimentos podrían producir historiales de aceleración muy parecidos con similares probabilidades de lesión siempre y cuando se filtre con la misma frecuencia.

Si no sucede de esta manera, los resultados pueden dar de forma dramática, diferentes aceleraciones máximas. Es el caso de la imagen siguiente.

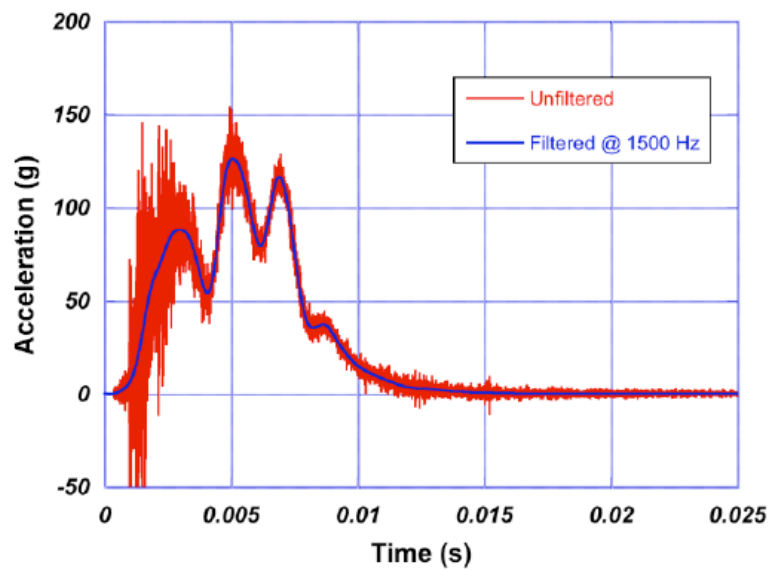


Ilustración 17. Comparación de picos de aceleración con y sin filtro

En este caso se puede apreciar claramente un pico de aceleración de 153G's cuando no se filtra y un valor de 126G's cuando se produce un filtrado a 1500Hz.

Otra vez se corrobora la sensibilidad del pico de aceleración que muchas veces no es deseable. Nuevamente, el HIC presenta un comportamiento mucho más estable frente a cambios de este tipo.

En este caso el HIC cuando la señal no es filtrada es de 441 y cuando sí lo es de 440. Por estas razones el rendimiento de las almohadillas se mide con este parámetro y no directamente con el valor de aceleración máxima.

3. Descripción de materiales en ABAQUS

El comportamiento real de elastómeros y espumas en condiciones de carga cíclica es, en general, bastante complejo.

Un fenómeno bastante común en estos casos se produce cuando una muestra de ensayo se somete a tensión simple desde su estado virgen, luego pasa un período sin carga y posteriormente se vuelve a someter a una tensión (Rubber 2013). Esa última tensión requerida para la recarga es menor que la carga inicial. Este fenómeno se conoce con el nombre de Efecto Mullins.

En ABAQUS se asumen algunas simplificaciones, pero el caso del efecto Mullins no es una de ellas, ya que por medio de varios parámetros como el DMENER (Damage dissipation density at an integration point), el ELDMD (Damage dissipation in an element) o el EDMDDEN (Damage dissipation per unit volume in an element) se puede hacer una buena estimación de este fenómeno.

En general, lo primero que hay que hacer para la definición de materiales en ABAQUS es saber exactamente qué parámetros se conocen de éstos, ya que, en función del comportamiento del material y la cantidad de los datos conocidos será más recomendable usar uno u otro método.

3.1. Hyperelastic, función de energía

Los materiales hiperelásticos se describen en términos de un potencial de energía de deformación, que se define como la energía de deformación almacenada en el material por unidad de volumen de referencia, entendiéndose por éste, el volumen de la configuración inicial, en función de la deformación en ese punto del material (Rubber 2013).

Existen varias formas de calcular estos potenciales de energía, y de esta manera poder modelar elastómeros isotrópicos: la expuesta por Arruda-Boyce, la de Marlow, la forma de Mooney-Rivlin, la Neo-Hookean, la fórmula de Ogden, la forma polinómica, la reducción de la forma polinómica, la de Yeoh, y por último la de Van der Waals (Rubber 2013).

Profundizando más en este ámbito, se puede considerar que los modelos polinomiales reducidos y los de Mooney-Rivlin pueden verse como casos particulares del modelo polinomial. Los potenciales de Yeoh y Neo-Hookean, a su vez, pueden ser vistos como casos especiales del modelo polinomial reducido. Es, por lo tanto, por lo que a estos modelos se les suele conocer como polinomiales.

Dependiendo de los datos obtenidos se actuará la siguiente manera (Rubber 2013):

- Cuando se dispone de datos de varios ensayos experimentales, las funciones de energía de Ogden y Van der Waals son las más precisas. Generando una curva que se ajusta perfectamente al comportamiento del material.
- Si se presenta la situación de conocer varios datos experimentales, pero del mismo estilo de ensayo, lo más coherente sería optar por ensayos uniaxiales como definición del material.
- Finalmente, si el número de ensayos es reducido y las repeticiones también, lo recomendable es escoger leyes como la de Arruda-Boyce o Marlow (Rubber 2013).

3.1.1. Ogden

La ecuación de definición de Ogden es la siguiente (Rubber 2013):

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left((\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right) \quad (3.1)$$

Donde λ son los principales valores de extensión; J es una medida de volumen relativo, μ_i es el módulo de cortadura, N es un número entero y, α y β , son exponentes de ajuste de la curva del coeficiente de Poisson. Siendo β :

$$\beta_i = \frac{v_i}{1 - 2v_i} \quad (3.2)$$

Donde v_i es el coeficiente de Poisson del material.

Actualmente, la función de energía de Ogden está considerada una de las más correctas para describir el intervalo de grandes deformaciones de materiales tipo caucho o goma.

Esta fórmula de Ogden toma la forma de la función utilizada en el modelo de Mooney-Rivlin. En este caso se usan modelos de 3 términos ($\lambda_1^{\alpha_i}, \lambda_2^{\alpha_i}, \lambda_3^{\alpha_i}$) pero hay ocasiones en los que se suelen utilizar hasta 4, aumentando así el nivel de precisión del modelo.

3.1.2. Van der Waals

En este caso la ecuación de Van der Waals ofrece la energía de deformación por unidad de volumen, y lo hace mediante la siguiente ecuación (Rubber 2013):

$$U = \mu \left(-(\lambda_m^2 - 3) (\ln(1 - \eta) + \eta) - \frac{2}{3} a \left(\left(\frac{I - 3}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \right) + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (3.3)$$

Donde,

$$I = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 p V^\gamma = p_0 V_0^\gamma \quad (3.4)$$

Y,

$$\eta = \sqrt{\frac{I - 3}{\lambda_m^2 - 3}} \quad (3.5)$$

Aquí μ es el módulo de cizallamiento inicial; λ_m es el tramo de bloqueo; a es el parámetro global de interacción; β es un parámetro de mezcla entre invariantes; y el parámetro D regula la compresibilidad.

La parte desviadora de la función de energía, se define mediante datos de ensayos de prueba equibiaxial o plana uniaxial. Por otro lado, la parte volumétrica se define proporcionando los datos de pruebas volumétricas, el coeficiente de Poisson, o también especificando las deformaciones laterales junto con los datos de prueba uniaxial, equibiaxial o planas.

3.1.4. Mooney-Rivlin

En mecánica de sólidos, un material de Mooney-Rivlin puede ser descrito por una combinación lineal de dos invariantes algebraicos del tensor de deformación de Cauchy (Rubber 2013).

Este modelo fue propuesto inicialmente por Melvin-Mooney y fue reformulado unos años después por Ronald-Rivlin.

La función de energía de Mooney-Rivlin se identifica con la siguiente expresión:

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (3.13)$$

Donde los parámetros C_{10} , C_{01} y D_1 son parámetros dependientes con la temperatura y al igual que en los casos anteriores, I_1 e I_2 son el primer y segundo invariantes, definidos como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3.14)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (3.15)$$

El parámetro λ se sigue definiendo por medio de las direcciones principales.

3.1.5. Neo-Hookean

Esta función de energía, al ser un caso específico de modelos polinomiales reducidos, tendrá una forma parecida al caso Mooney-Rivlin (Rubber 2013):

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (3.16)$$

Siendo todos los parámetros de esta fórmula los mismos que en el caso de Mooney-Rivlin, debido a que es una simplificación de este último.

3.2. Otros

Además de los métodos mencionados, el programa permite modelar un material por medio de sus curvas características.

De este modo, conociendo la curva tensión-deformación y a la velocidad de deformación que fue medida, se puede conocer el comportamiento del material.

4. Análisis experimental y simulación numérica

4.1. Introducción

En esta parte se procederá a la explicación de los ensayos realizados mediante una máquina de compresión (Mills 2006). De esta manera, se pueden imponer valores de velocidad, fuerza, deformación, tensión, entre otros. Posteriormente, se podrán obtener parámetros como, acortamiento, energía absorbida, aceleración... para así poder hacer un análisis del comportamiento del material en estas condiciones.

Seguidamente, se intentará simular estos resultados en ABAQUS y de esta manera, obtener el ensayo de forma numérica y así poder comparar varios tipos de materiales sin la necesidad de recurrir a ensayos experimentales.

4.2. Material

Como para el ensayo se necesitan materiales que absorban energía, Mills optó por el poliuretano o derivados. Esto es debido, a que presentan muchos tipos de fenómenos viscoelásticos, tales como: pérdidas de energía en la carga cíclica y fluencia en la carga estática. Este comportamiento, tiene especial importancia en ámbitos de impacto, ya que la amortiguación de la espuma reduce la amplitud de las vibraciones de resonancia.

A la hora de caracterizar el material viscoelástico, se hará tanto microscópica como macroscópicamente.

4.2.1. Modelo viscoelástico

Los datos de la tensión de relajación del polímero, pueden ser aproximados por un conjunto de elementos viscoelásticos Maxwell (un resorte y un amortiguador en serie) en paralelo, además, en tiempo infinito se puede describir como un solo elemento elástico (Mills 2006).

Este modelo viscoelástico se describe en el programa ABAQUS, mediante una función de relajación de cizallamiento modulada por:

$$G(t) = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i \exp \left(-\frac{t}{\tau_i} \right) \right) \quad (4.1)$$

Donde G_0 es el módulo de cortadura instantáneo y el g_i el módulo de relajación de cizalladura asociado a dichos tiempos.

$$\tau_i = \frac{\eta_i}{G_i} \quad (4.2)$$

La suma de estos g_i nunca debe pasar el valor 1 y el valor de G_∞ tiene que ser positivo. G_0 se calcula a partir del módulo de Young mediante la siguiente fórmula:

$$G_\infty = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i \right) \quad (4.3)$$

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1 + \nu_0)} \quad (4.4)$$

Donde E_0 es el módulo de Young, y ν_0 es el coeficiente de Poisson del material.

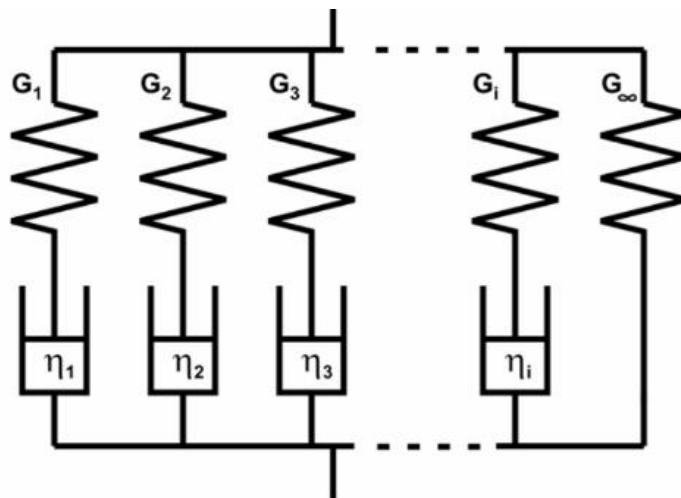


Ilustración 18. Elementos viscoelásticos de Maxwell en paralelo

En ABAQUS, este modelo se denomina como una serie de Prony, debido a su fórmula matemática.

Sabiendo las fórmulas a aplicar, solamente falta introducir los datos del material que en este caso son:

Parámetro	Valor
E_0	100 MPa
ν_0	0.45
G_0	34.5 MPa

Ilustración 19. Datos del poliuretano

Quedando los siguientes parámetros de g_i :

Tiempos τ_i (s)	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	10
1			0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		
3			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		

Ilustración 20. Resultados obtenidos para el poliuretano

4.2.2. Modelo “hyperfoam”

La parte “hyperfoam” se basa en la teoría de los sólidos hiperelásticos compresibles. En este caso se describirá por medio de la función de energía de Ogden (la cual se ha explicado anteriormente):

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left((\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \right) \quad (4.5)$$

En este caso, los parámetros del material a introducir son los siguientes:

Materiales	Módulo de cortadura (KPa)	α	ν
1	18	8	0
2	1.2	-2	0.45

Ilustración 21. Parámetros hiperelásticos del poliuretano

Conociendo todos estos valores, se puede pasar a la introducción de ellos en ABAQUS y de esta manera tener el material definido tanto micro como macroscópicamente.

4.2.3. Enfoques de viscoelasticidad en ABAQUS

Hay dos métodos principales de considerar la viscoelasticidad en ABAQUS (Mills 2006), Mills recomienda el primero cuando no se quiere la simulación de ondas de sonido en el material, esto se hace con una serie de Prony con tiempos de relajación y añadiendo el STEP como Standard (implicit).

El segundo método, lo recomienda cuando los efectos de las ondas sonoras son importantes. También utiliza una serie de Prony con tiempos de relajación, pero en este caso define un STEP como Dynamic.

La densidad del poliuretano controla la velocidad del sonido en el material y, por consiguiente, determina el tiempo para los cálculos explícitos en el modelo numérico.

El método explícito realiza una sola estimación del intervalo de tensión en el siguiente intervalo de tiempo. Este tiempo debe ser menor que el tiempo de una onda de sonido al cruzar el elemento más pequeño (Mills 2006).

En la simulación de ensayos de impacto sobre grandes bloques de espuma, el tiempo total de simulación es del orden de 20 ms. Las ondas de sonido en estas simulaciones son relevantes para la interpretación de las pruebas de impacto de espumas (Mills 2006).

El desplazamiento de la parte superior de la espuma se alinea gradualmente durante cada paso para crear una serie de cepas de espuma. Por lo tanto, la velocidad de deformación es constante durante la carga o descarga.

Además, según Mills, en el análisis dinámico, una masa rígida se puede usar para impactar la superficie superior de la espuma. La masa es suficiente como para causar la máxima tensión de compresión en el cuerpo, mientras que su velocidad inicial determina la velocidad de deformación inicial para la carga. Como la masa se desacelera a 0, entonces rebota y la espuma se somete a un ciclo de carga y descarga y la velocidad de formación varía con el tiempo, a diferencia de la simulación estándar.

Para el análisis de espumas en micromecánica con células de tamaño menores a un milímetro, el tiempo puede ser extremadamente pequeño, lo que conlleva a un cálculo lento. En este caso, desprecia el impacto de las ondas sonoras en el ensayo.

4.3. Compresión cíclica de una espuma de poliuretano virgen y otra remodelada

Para la realización del ensayo Mills ha optado por un bloque de espuma de poliuretano de densidad 25.8 Kg/m^3 . Como se ha comprobado (Mills 2006), se trata de una microestructura bastante común de célula abierta.

Partiendo de la base de que el poliuretano sólido tiene una densidad de 1200 Kg/m^3 , se puede decir que la espuma posee una densidad relativa de 0.0215.

Por otro lado, se encuentra la espuma remodelada, la cual tiene una densidad de 72 Kg/m^3 . Este tipo de materiales, al ser espumas, contienen numerosas cavidades en el interior de su cuerpo. En este caso concreto, tiene una media de apertura de huecos de 8mm, que son uniaxialmente comprimidos por cantidades variables de fuerzas en el proceso de moldeo.

Para este análisis Mills utilizó una máquina de ensayos de compresión Instron. La prueba consiste en introducir el cuerpo en cuestión en las plataformas de la máquina, posteriormente se aplica una determinada velocidad de desplazamiento de una de estas placas y se obtienen diferentes parámetros de comportamiento del material.



Ilustración 22. Máquina de compresión Instron utilizada por Mills en sus ensayos

En este caso concreto, las pruebas las realizaron con cubos de espuma de 50mm de lado. Para el cuerpo de espuma virgen, la dirección de aplicación de la fuerza es

irrelevante, en cambio para la espuma de poliuretano remodelada, es de vital importancia que el desplazamiento se efectúe en la dirección correcta, que, en este caso, es en la línea paralela al plano con el que se ha cortado la espuma.

Una vez estén los cuerpos correctamente colocados, aplican una tasa de compresión lenta y constante de 20mm/min, para que, de esta manera, no haya interferencia de la tensión del material con la tensión generada por los gases al comprimirlos.

Los ciclos de compresión los tomaron al 25%, 50% o 75% del recorrido total de la placa, con períodos de recuperación de 1 hora para la espuma virgen, y de 5 minutos para la espuma remodelada.

Como se puede ver en la ilustración 23, la espuma virgen presenta importantes picos en su comportamiento, es decir, genera picos más inestables y poco predictivos, comportándose de diferentes modos dependiendo del historial de compresión soportada y de la deformación adquirida.

Sin embargo, en la espuma remodelada (ilustración 24) se obtiene un comportamiento mucho más estable frente a deformaciones. Esta segunda espuma, es mucho más homogénea que la espuma virgen, siendo esta la explicación a su comportamiento más lineal.

Comparando ambas gráficas, se aprecia claramente que, en el primer tipo de espuma, tiene un peso importante el historial de cargas y descargas que se han realizado sobre ésta, sin embargo, en el segundo tipo, la dependencia es mucho menor.

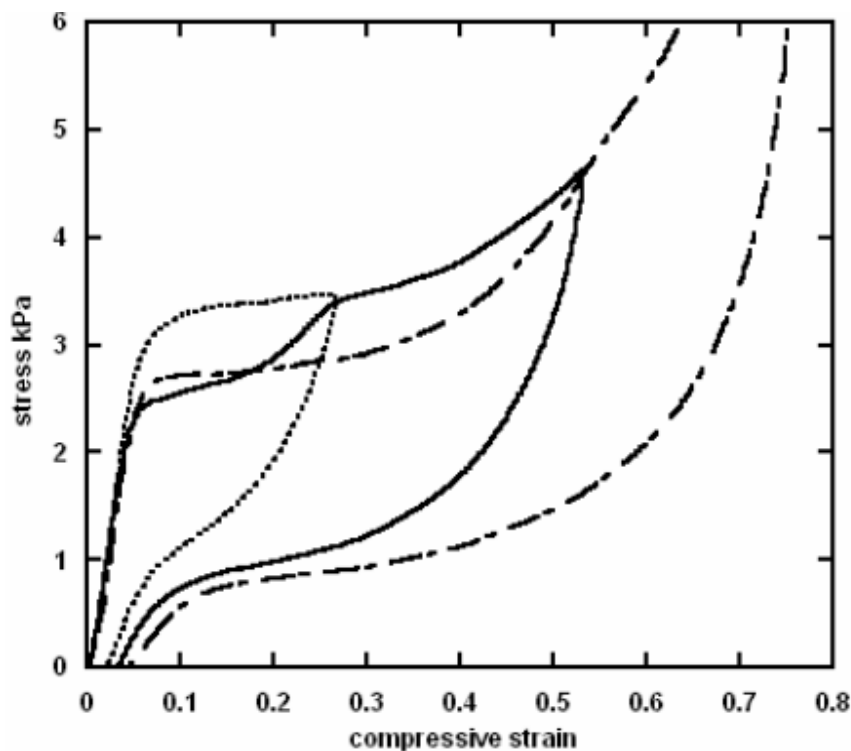


Ilustración 23. Espuma de poliuretano virgen

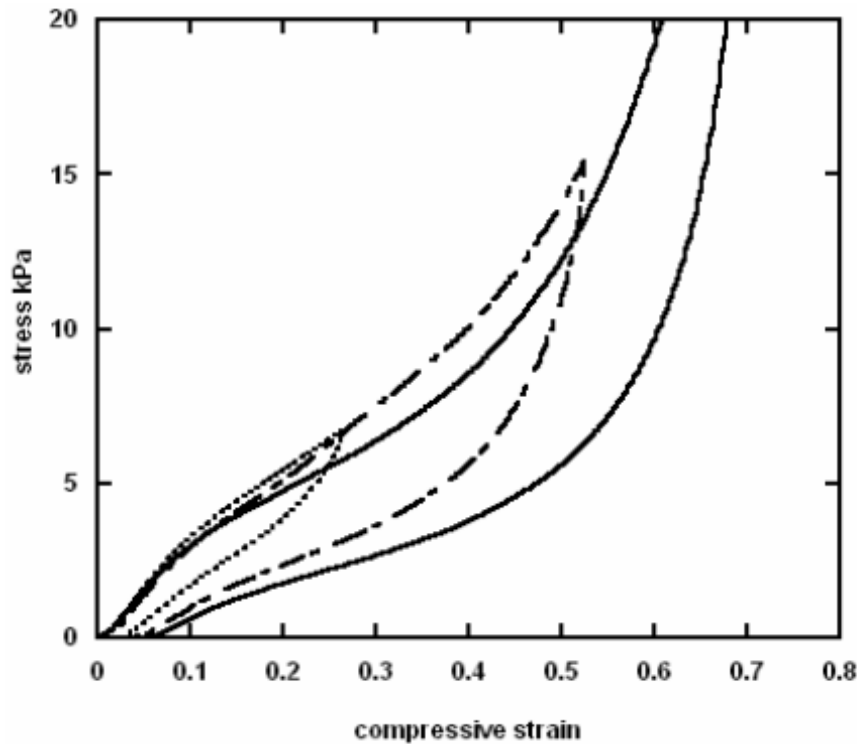


Ilustración 24. Espuma de poliuretano remodelada

Otro aspecto importante en este tipo de espumas es la histéresis (Mills 2006), esta capacidad para disipar energía es mucho mayor en la espuma virgen que en la remodelada. Este parámetro es algo que es muy importante en términos de impacto, ya que de esta manera se puede cuantificar cuanta energía es capaz de devolver el material tras el impacto.

A continuación, se muestra una tabla con la histéresis medida por Mills en cada material en función de la deformación:

Espuma	25%	50%	75%
Virgen	53	56	60
Remodelada	35	43	49

Ilustración 25. Histéresis de cada material en los ensayos realizados por Mills

4.4. Modelo numérico de compresión de espumas

Una vez conocido cómo se puede definir el comportamiento del material en ABAQUS, sus propiedades, las leyes que lo caracterizan y su comportamiento real en el

ensayo anterior, Mills expone el resto de datos que son necesarios introducir en el programa.

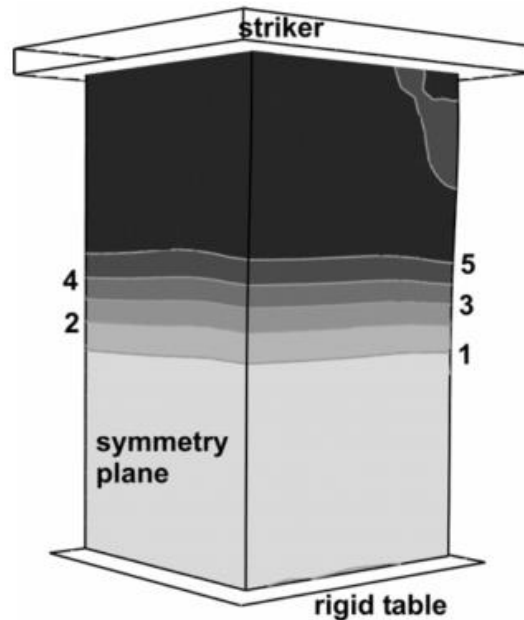


Ilustración 26. Esquema de ensayo numérico realizado por Mills

Para ello toma un cuerpo de espuma, que posee las siguientes dimensiones: sección de 25x25mm (ancho por alto) y una profundidad de 100mm. El material escogido es el de espuma remodelada, por tanto, tendrá una densidad de 72 Kg/m³.

El impactador o placa superior, tiene una masa de 0.5 Kg y para el ensayo descenderá con una velocidad de 3.5m/s, causando una velocidad de deformación inicial de 35/s (Mills 2006). Un esquema del ensayo se representa en la ilustración 26.

Para comprobar la sensibilidad del mallado, Mills lo ensayó con diferentes medidas: 10, 5 y hasta 2.5mm de intervalo entre un elemento y otro. Como resultado obtuvo que, para las distancias de 5 y 2.5, las soluciones fueron exactamente iguales, sabiendo de esta manera que el ensayo ha convergido a la solución correcta (Mills 2006).

Otro aspecto importante a la hora de definir el modelo es imponer las condiciones de contorno. Un lado de la placa se quedará rígido, es decir, no tendrá ningún grado de libertad en esta parte, prohibiendo así cualquier movimiento. Esto se debe a que este lado de la espuma se encuentra en contacto con el resto del cuerpo en cuestión (en casos reales) y se puede suponer que actúa a modo de cuerpo rígido en caso de impacto.

Para poder tener una solución fiable del ensayo se debe delimitar también, el movimiento de la espuma, es decir, para que el caso en el que se aplique una carga, ésta no pandee. Esto se soluciona imponiendo como condición que el cuerpo de espuma sólo

tenga libertad de movimiento en la dirección de aplicación de la fuerza, y así se asegura que el material absorbe toda la energía transmitida por el impactador.

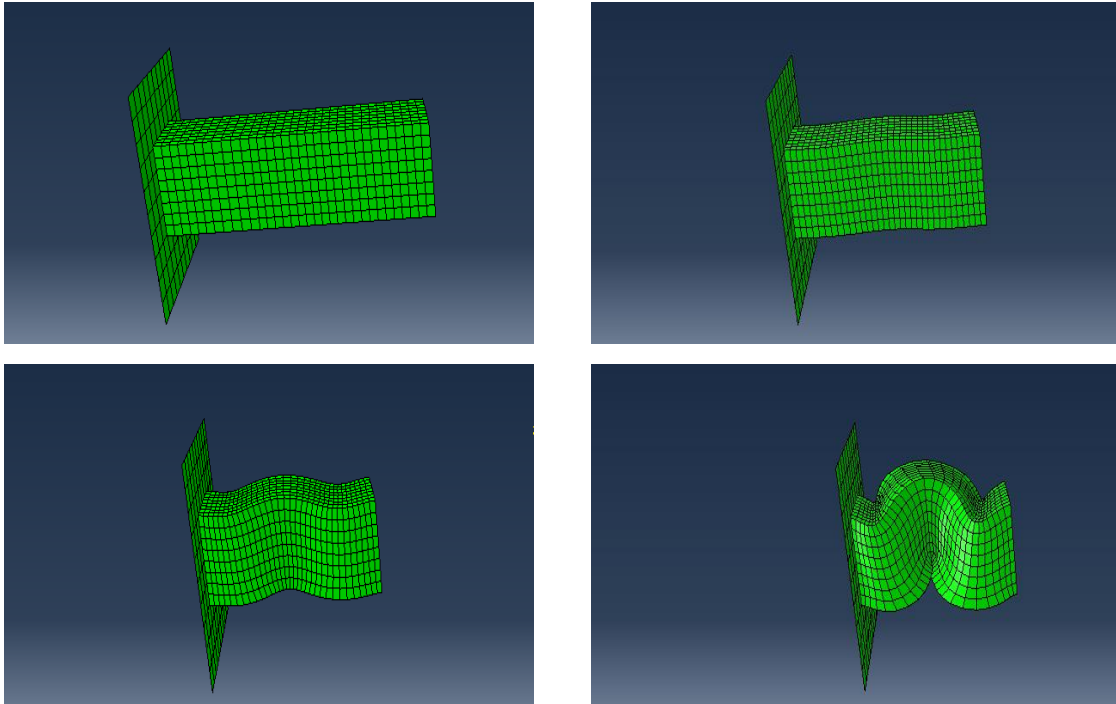


Ilustración 27. Secuencia de pandeo en el caso de no delimitar el movimiento de compresión

Una vez limitada la deformación de la espuma a la dirección de aplicación de la fuerza, se puede decir que el contacto entre la placa y la espuma a ensayar se puede considerar sin rozamiento. Esto se debe a que sea cual sea el valor que se le otorgue al rozamiento no afectará a los resultados obtenidos.

El material, como se ha explicado anteriormente, lo describió mediante los datos de la serie de Prony descrita en la ilustración 20. Al tratarse de un ensayo con velocidad de deformación variable, optó por un STEP tipo Dynamic.

El primer contacto de la placa con la espuma crea un impulso de presión que se desplaza hacia abajo a través del cuerpo. Como se puede ver en las gráficas posteriores, pasado un tiempo, la tensión en la parte superior queda constante y con un valor de 6KPa, mientras que a medida que se va bajando en la profundidad del cuerpo se puede ver que está casi libre de fuerzas (Mills 2006).

A medida que se va aumentando el tiempo de ensayo, la región de mayor tensión se propaga a la superficie inferior de la muestra. Una vez llegado aquí, la tensión vuelve a retomar el camino por el que ha venido hasta llegar a la parte superior de la muestra.

Este fenómeno es debido a la inercia de la espuma, al tratarse de una espuma de poliuretano remodelada, su densidad es relativamente alta y a que posee un bajo módulo de elasticidad (Mills 2006).

Estos impulsos desaparecen definitivamente cuando se llega a la deformación final de la espuma ya que las oscilaciones de tensión debidas a la carga también lo hacen y se llega a lo que se conoce como estado estacionario.

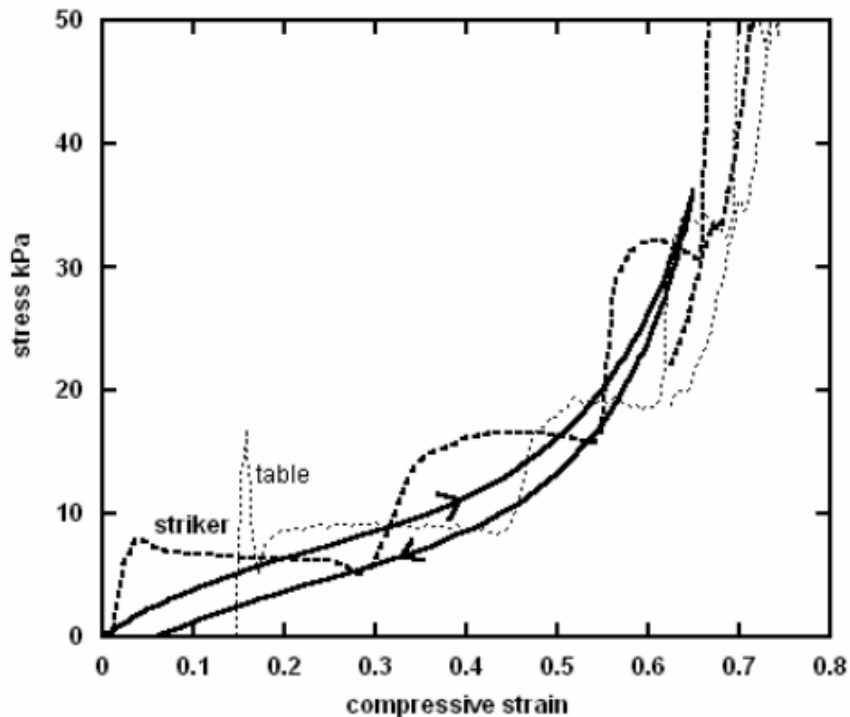


Ilustración 28. Resultado de la simulación de compresión de la espuma

Como se puede apreciar en la imagen anterior, se puede decir que Mills obtuvo una simulación que es fiel a la realidad ya que los resultados concuerdan con los parámetros obtenidos experimentalmente a excepción de estas oscilaciones creadas por la tensión. Si el ensayo se realizara de una forma estacionaria, como resultado se obtendría la curva de los resultados experimentales.

En esta primera parte de la gráfica, se puede ver un salto inicial de 5KPa con unas pequeñas oscilaciones. Según reporta Mills en su artículo, en otra simulación con 5Kg de peso de la placa y una velocidad de impacto inferior, el nivel de oscilaciones aumentaba considerablemente, pero con un menor paso entre ellas. Lo que hace que esas vibraciones se asemejen más a la curva experimental (Mills 2006).

Por tanto, si se quiere hacer ensayos con masas mayores para obtener resultados más precisos hay que tener en cuenta que la sensibilidad de la aceleración se reduce a medida que se aumenta la masa. De esta manera es más difícil detectar el impacto inicial y qué valor tiene.

Como bien muestra la ilustración 28, la curva simulada converge hacia la de resultados experimentales a mayores deformaciones.

También cabe destacar que la histéresis simulada por ABAQUS (Mills 2006) es considerablemente menor con un STEP Standard que con uno Dynamic, siendo la predicción del primero del 22% y en el dinámico del 35%, debido a la velocidad de deformación más constante en el primero de los casos.

4.5. Modificaciones aplicadas al modelo numérico

Para realizar el análisis de diferentes materiales, se ha tomado como base la simulación anterior. También ha sido necesario introducir las siguientes modificaciones al modelo:

- El **material**. Como se pretende hacer una comparación de las espumas, se debe hacer un ensayo con cada tipo de material.
- **Velocidad de impacto**. En este punto se ha tenido en cuenta el criterio impuesto por la armada. Éste identifica un rango entre 1.52-6.1m/s como impactos relevantes a velocidades no letales (W. C. Moss, King, y Blackman 2014).

En este caso, se ha optado por una velocidad de **3.5m/s**, un valor intermedio entre el máximo y mínimo que puede aportar datos interesantes sobre la mayoría de impactos no letales

- El modo de **describir el material**. Debido a que se trata de materiales comerciales, y cada uno tiene especificaciones muy particulares, no es posible introducir una ley de comportamiento en ABAQUS.

Como solución a ello se ha optado por caracterizar estos materiales por medio de curvas tensión-deformación. Con estas gráficas, junto con las velocidades de deformación a las que fueron descritas, se puede obtener el comportamiento de estas espumas de forma bastante precisa.

Este modo de descripción se encuentra en el apartado de descripción de material y posteriormente en Low Density Foam. A partir de ahí, introduciendo los valores de tensiones y deformaciones medidos con su respectiva velocidad de deformación se puede representar de forma numérica el comportamiento del material.

- El **STEP**. Al tratarse de unas velocidades de deformación considerables, la definición del STEP se hará como Dynamic, teniendo en cuenta así, todos los aspectos dinámicos que tendrán lugar en el ensayo.
- **Resultados**. El fin de esta simulación no es la comparación de curvas (entre la realidad y el modelo numérico), sino dar una solución real al cuantificar la seguridad de estos materiales en función del HIC dado y la energía absorbida en el impacto.
- **Mallado**. Es cierto que en el modelo propuesto se asegura que la solución numérica converge rápidamente con valores relativamente altos de espaciado

entre elementos, pero en este caso debido a que los materiales en cuestión son diferentes y a que las condiciones de contorno no son las mismas (varían parámetros como la velocidad de deformación) es necesario comprobar el análisis de sensibilidad de la malla.

Si después de variar varias veces la distancia de espaciado entre elementos, se sigue obteniendo la misma solución se puede decir que la solución ha convergido a un valor y por tanto la aproximación numérica se acerca más a la realidad.

5. Materiales empleados

En la mayoría de proyectos y estudios se hacen pruebas con materiales “de laboratorio” entendiéndose por estos tipos de espumas en su estado puro. Un ejemplo de ello podría ser ensayos con espumas de poliuretano o de poliestireno.

En este proyecto se ha querido dar una situación lo más real posible y es por ello por lo que se ha optado, en la mayoría de materiales, por espumas comerciales. De esta forma se concreta específicamente con qué espumas se consiguen estos resultados y se pueden adquirir fácilmente en el mercado.

Como inconveniente se presenta esa incertidumbre que hace que no haya ninguna ley específica que describa su comportamiento de forma exacta, pero se puede aproximar por medio de ensayos.

A continuación, se describirán los materiales escogidos, así como las curvas características de tensión-deformación elegidas para caracterizarlo.

5.1. Airex

La espuma Airex está caracterizada en el mercado como espuma de alto rendimiento (Flores-Johnson y Li 2010). Es un material que ofrece una muy buena resistencia térmica, también química, así como inherentes propiedades de retardo de llama.

Además, posee una muy buena estabilidad, resistencia y rigidez, además de una excelente resistencia a la abrasión.

El procesamiento de la espuma se puede decir que es bastante bueno ya que sus propiedades mecánicas hacen que sea bastante fácil trabajar con ellas.

Debido a su amplio abanico de características está presente en muchas industrias, como pueden ser la química, automotriz, aeroespacial. Últimamente debido a su bajo costo de fabricación, el material en sí, se destina como reemplazo de las piezas de metal tradicional y productos para el hogar.

Su estructura molecular (polieterimida) es la siguiente:

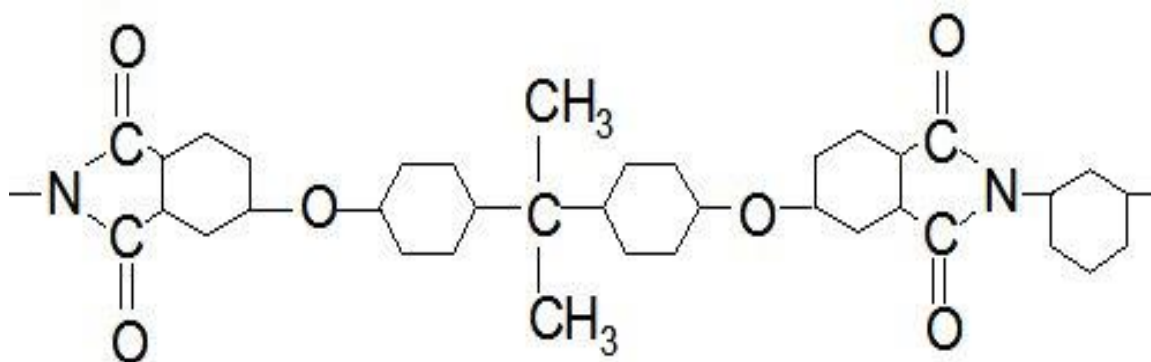


Ilustración 29. Estructura química de la Polieterimida

La densidad las espumas de este material varían entre 60 y 80 Kg/m³. Este tipo de espuma ha sido investigado por Flores-Johnson y Li (2010). Ambos dividieron los materiales en dos: por un lado, espumas de densidad igual a 60 Kg/m³ que la llamaron Airex 82.60 y por el otro las de densidad igual a 80 Kg/m³, llamándose Airex 82.80.

Durante este ensayo se probarán ambas espumas para ver cuál de las dos tiene un mejor comportamiento frente a impactos.

5.1.1. Airex 82.60

Concretamente, la Airex 82.60 es ligeramente menos densa que el otro modelo, sin embargo, sus propiedades mecánicas son bastante diferentes (Flores-Johnson y Li 2010):

Espuma	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Deformación elástica	Deformación plástica
Airex 82.60	28.4	0.71	3.4	60.3

Ilustración 30. Propiedades mecánicas de la espuma Airex 82.60

Y la curva tensión-deformación correspondiente a una velocidad de deformación de **0.0008.3/s** es:



Ilustración 31. Espuma Airex 82.60 gráfica tensión-deformación

5.1.2. Airex 82.80

Esta espuma sigue estando compuesta por polieterimida pero de una densidad ligeramente superior (Flores-Johnson y Li 2010), lo que supone un cambio en sus propiedades mecánicas al igual que un importante cambio en la curva de tensión-deformación.

Sus propiedades mecánicas pueden resumirse en:

Espuma	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Deformación elástica	Deformación plástica
Airex 82.80	42.1	1.13	3.3	58.4

Ilustración 32. Propiedades mecánicas de la espuma Airex 82.80

Al igual que la gráfica anterior, la velocidad de deformación es de **0.0008.3/s** quedando los siguientes valores:



Ilustración 33. Espuma Airex 82.80 gráfica tensión-deformación

5.2. Corcho aglomerado

El corcho es un material celular con una mecánica muy compleja, pero con propiedades de absorción muy buenas y es por esto por lo que se sigue estudiando a día de hoy este material.

En este caso se ha optado por un corcho aglomerado en vez de uno natural debido a que éste tiene propiedades más uniformes y se pueden fabricar industrialmente con dimensiones y geometrías mucho más variadas que el otro.

Además, con el uso de este material se está contribuyendo al reciclaje de material ya que su fabricación se basa en la molienda y posterior compresión de tapones de corcho natural y todo tipo de desecho del corcho Amadia.

Este tipo de material posee, además, pegamento para que se obtenga una estructura firme y rígida. Este elemento se puede considerar despreciable en el ensayo del material ya que no contribuye de ninguna manera en términos de impacto sino simplemente de sujeción del cuerpo (Fernandes, Pascoal, y Alves de Sousa 2014).



Ilustración 34. Corcho aglomerado

Como se puede apreciar en la imagen 34, su comportamiento mecánico se caracteriza por una primera parte elástica curva que es debido principalmente a la resistencia a flexión de las paredes celulares.

La siguiente zona es un tramo prácticamente horizontal, que es debido al aplastamiento progresivo de estas paredes, lo que da valores de entre 0.5 y 1MPa. La razón por la que no ofrece un comportamiento horizontal en la zona central, es que en esta parte entra en juego la heterogeneidad de la estructura, siendo ésta una barrera a superar por las tensiones.

En el caso del corcho aglomerado, esta barrera se acentúa, ya que al estar fabricados aplicando una fuerza, estos espacios entre las paredes se reducen haciendo que sea necesario un valor de la fuerza mucho mayor al del corcho natural. Haciendo que este tramo horizontal desaparezca prácticamente.

Por último, existe un importante aumento de valores de tensión, lo cual hace pensar que es debido al colapso final de estas células. Esto se produce para valores de tensión superiores al 50% y se conoce como densificación.

Material	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Poisson	N	r	m
Corcho aglomerado	15	-	293	0.3	3	1.01	0.1

Ilustración 35. Propiedades mecánicas del corcho aglomerado

La respuesta a por qué se ha optado por este material, ya que no es una espuma, reside en lo anteriormente dicho y es que su comportamiento se asemeja mucho al de una espuma, ya que las cavidades de aire en el interior del cuerpo le dan esa facilidad para deformarse y absorber energía.

El corcho aglomerado, ya que es un elemento bastante común, sí que tiene una ley en ABAQUS que pueda definir su comportamiento, como se ha demostrado en artículos anteriores (Fernandes, Pascoal, y Alves de Sousa 2014)

En este caso se trata de un material que se ajusta a lo que se denomina como Mullins Effect, siendo sus parámetros de descripción los mostrados en la ilustración 35. Para tener una idea de su comportamiento se adjunta una tabla con la curva tensión-deformación:

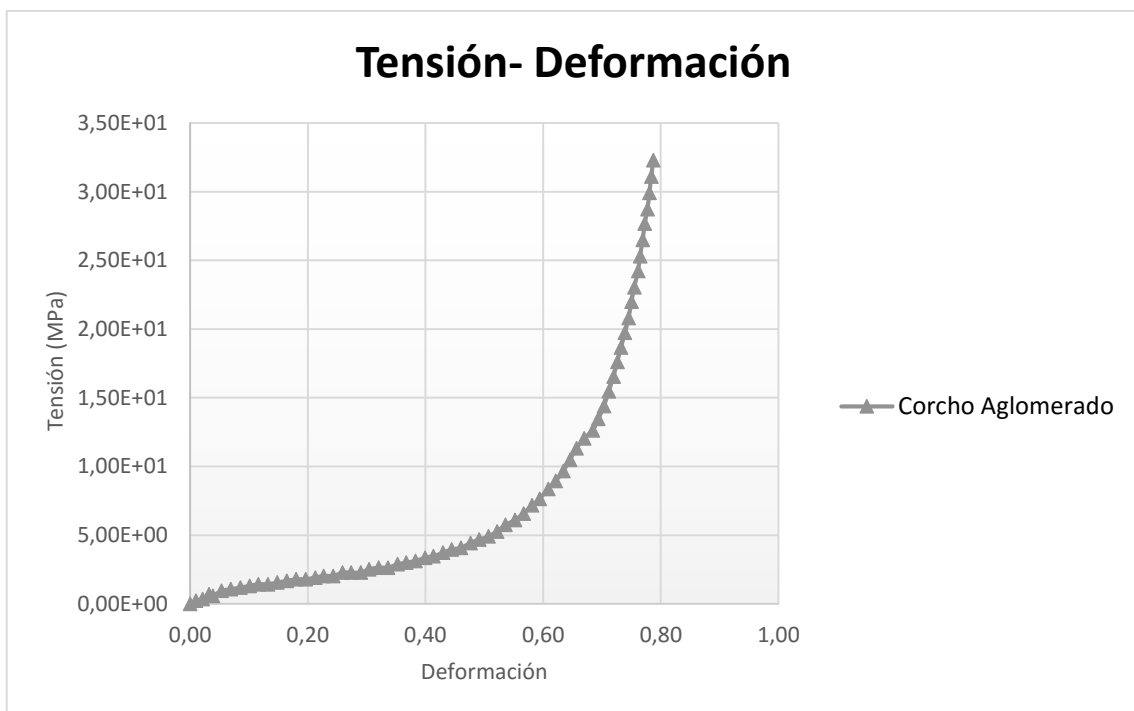


Ilustración 36. Gráfica tensión-deformación del corcho aglomerado

5.3. Riddell

Las almohadillas Riddell generalmente están compuestas por espumas bicapas. Por un lado, se encuentra una espuma más dura y por el otro la más blanda.

Ambos cuerpos están rodeados por una bolsa de polímero hinchable, el cual posee canales por los cuales el aire puede pasar de una parte a otra y de una almohadilla a otra. Esto es de vital importancia en elementos como cascos, en los que la ventilación juega un papel importante en las características técnicas de este tipo de protecciones.

En el caso de las almohadillas se desconoce su composición química y de qué materiales están hechas, ya que es parte del secreto del éxito de esta empresa.



Ilustración 37. Espuma Riddell en cascos de protección

Lo que si se ha podido conseguir son datos experimentales. En estos ensayos realizados (W. C. Moss, King, y Blackman 2014), se han obtenido por un lado las curvas tensión-deformación del material más blando y por el otro el del material más duro.

En estas simulaciones se ha optado por dar cada espuma por separado porque al fin y al cabo son elementos con distintas propiedades mecánicas, y el objetivo del trabajo reside en ver qué material sería más adecuado para cada situación.

5.3.1. Riddell Soft

Esta espuma tiene una densidad, como cabría esperar, menor que la espuma dura, en torno a unos 66.9 Kg/m^3 .

A continuación, se podrá ver la curva característica del material más blando de los dos compuestos, con una velocidad de deformación de **2/s**:



Ilustración 38. Riddell Soft gráfica tensión-deformación

5.3.2. Riddell Hard

En el otro lado de la almohadilla se encuentra la parte más dura de ésta, siendo el elemento que más energía absorbe, con una densidad en torno a unos 97.7 Kg/m³.



Ilustración 39. Espuma Riddell Hard gráfica tensión-deformación

La curva característica de este material, esta extraída de una velocidad de deformación de 2/s, se muestra en la ilustración 39.

5.4. Rohacell

Al igual que la Airex, la espuma Rohacell está considerada en el mercado como una espuma polimérica de alto rendimiento. La densidad de este material está en torno a los 58 Kg/m³ compuesto principalmente por polimetacrilimida, la cual tiene la siguiente estructura química (Flores-Johnson y Li 2010):

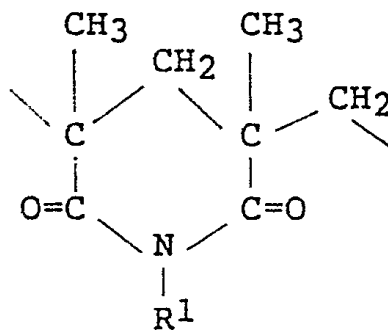


Ilustración 40. Estructura polimetacrilimida

Las propiedades de esta espuma ofrecen buenas prestaciones a altas temperaturas y presiones. También son fácilmente procesables ya que poseen una importante rigidez estructural, lo que conlleva a importantes ahorros en costes de fabricación.

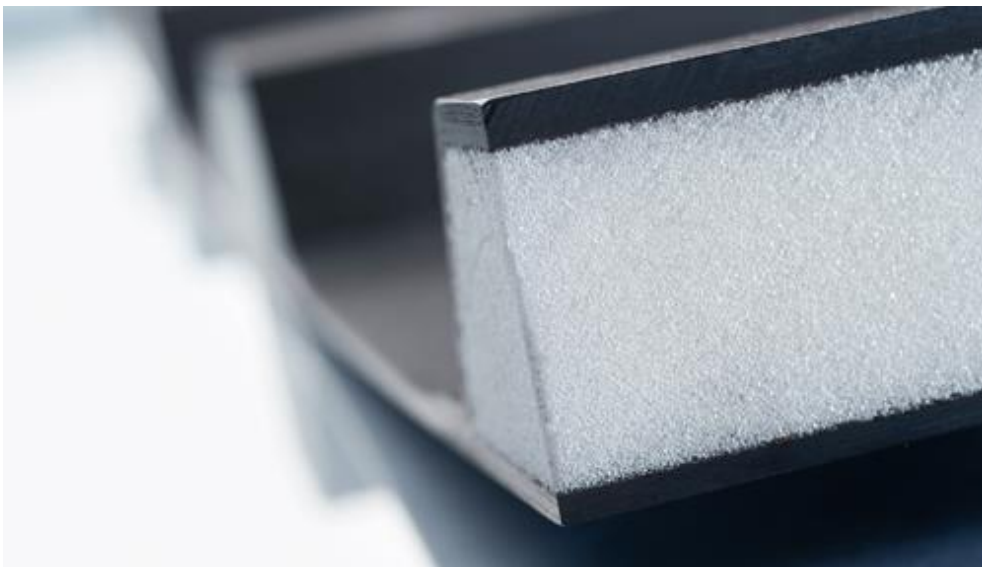


Ilustración 41. Espuma Rohacell

Las espumas Rohacell compuestas por polimetacrilimida, se ha estado utilizando en varios campos de la sociedad actual, como por ejemplo, la industria automovilística, aeroespacial, también en el campo de la medicina, barcos, ferrocarriles, aerogeneradores entre otros.

Dependiendo de la densidad y las características del tipo de espuma en concreto se podrán encontrar un amplio abanico de propiedades, pero en general soportan temperaturas de hasta 190°C.

Respecto a sus propiedades mecánicas, se puede decir que, la curva tensión-deformación, corresponde con el siguiente gráfico:



Ilustración 42. Espuma Rohacell gráfica tensión-deformación

5.5. Oregon

Este tipo de almohadillas, al igual que las Riddell, están compuestas por dos capas de espumas, sin embargo, a diferencia de éstas, en las almohadillas Oregon resulta prácticamente imposible evaluar cada una por separado, ya que, a la hora de dividir las, es posible que afecte a las propiedades de las mismas, dando resultados que no son fieles a la realidad.

Los ensayos para obtener las curvas características de estas almohadillas fueron realizados por W. C. Moss, King, y Blackman 2014. En este experimento también exponen una recomendación, y es colocar la zona más blanda de la almohadilla en la zona

de la cabeza o parte del cuerpo a la que vaya destinada este tipo de protección, dejando así la zona dura para la parte donde se produce el impacto con más energía; es decir, en el exterior de la almohadilla.



Ilustración 43. Espuma Oregon

Estas almohadillas están envueltas por un revestimiento de polímero unido a las espumas y a una cubierta de tela sin ataduras. En este experimento se puede considerar despreciable tanto del revestimiento como el de la tela, en relación con las espumas ya que éstas últimas son las que absorben toda la energía.

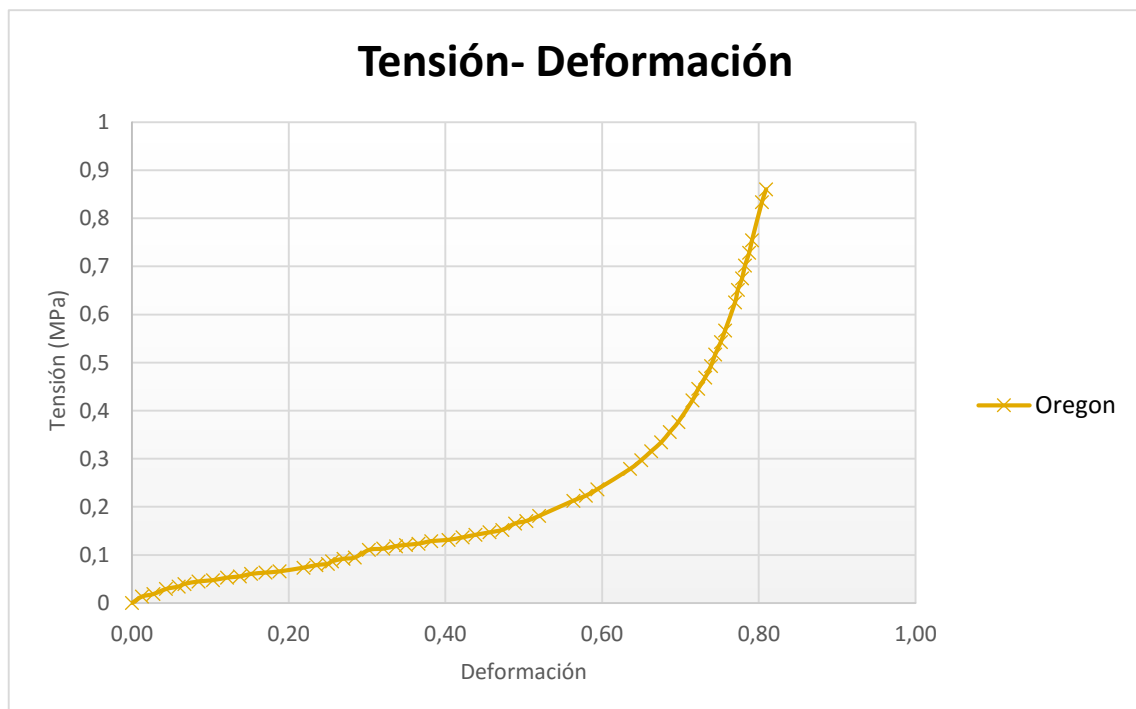


Ilustración 44. Espuma Oregon gráfica tensión-deformación

A pesar de que no se conoce la estructura de la espuma se puede decir que cumple con las características buscadas de tres fases bastante diferenciadas. La curva que responde a una velocidad de deformación de $4/s$ de las espumas Oregon es la que se muestra en la ilustración 44.

La primera es un comportamiento prácticamente lineal, en la que predomina un comportamiento elástico. Es verdad que es difícil conocer su límite elástico, pero, aunque no se sepa exactamente donde empieza o acaba un tramo u otro, se sabe que existen.

La segunda fase es lo que se conoce como el tramo valle. En él entran en juego las cavidades del interior de la espuma, éstos van reduciendo su volumen hasta que se tocan las paredes del material.

Una vez que los materiales se tocan, empieza la zona de endurecimiento o de densificación, en este tramo la tensión necesaria para generar una deformación aumenta exponencialmente, lo que hace que la espuma se comporte prácticamente como un material sólido.

5.6. Team Wendy

El material ofrecido por Team Wendy también está compuesto por dos tipos de espumas, una más dura que la otra al igual que en los dos casos anteriores. En este caso, al igual que con las almohadillas tipo Riddell, sí que es posible hacer una separación de ellas y hacer un análisis por separado.



Ilustración 45. Espumas Team Wendy en un casco de protección

Las densidades ofrecidas oscilan entre 55 y 60 Kg/m^3 de la blanda y dura respectivamente.

Como se puede apreciar en la ilustración 45, se trata de materiales profesionales que pueden ser perfectamente usados a día de hoy. Por razones obvias no se conoce exactamente la composición de este tipo de almohadillas, por tanto hay que recurrir a ensayos experimentales para conocer su comportamiento (W. C. Moss, King, y Blackman 2014).

5.6.1. Team Wendy Soft

En este caso la parte blanda de la espuma tiene una densidad de 55 Kg/m^3 , y la curva correspondiente a una velocidad de deformación igual a $0.02/\text{s}$ es la siguiente:



Ilustración 46. Espuma Team Wendy Soft gráfica tensión-deformación

5.6.2. Team Wendy Hard

En el otro lado de la almohadilla se encuentra la parte dura. Ésta tiene una densidad en torno a 60 Kg/m^3 .

En este caso la velocidad de deformación a la que se ha medido el ensayo es un tanto mayor que en el caso anterior, alcanzando valores de $2/\text{s}$ (ilustración 47).

De todos los materiales formados por dos espumas, es en este caso, donde la diferencia entre un material y otro se reduce bastante, llegando tener curvas de tensión-deformación prácticamente iguales.

A decir verdad, en cierto modo se esperaba un comportamiento similar ya que las densidades de uno en comparación con el otro son prácticamente iguales.

La curva tensión-deformación de esta especificación de las espumas Team Wendy tiene la siguiente forma:

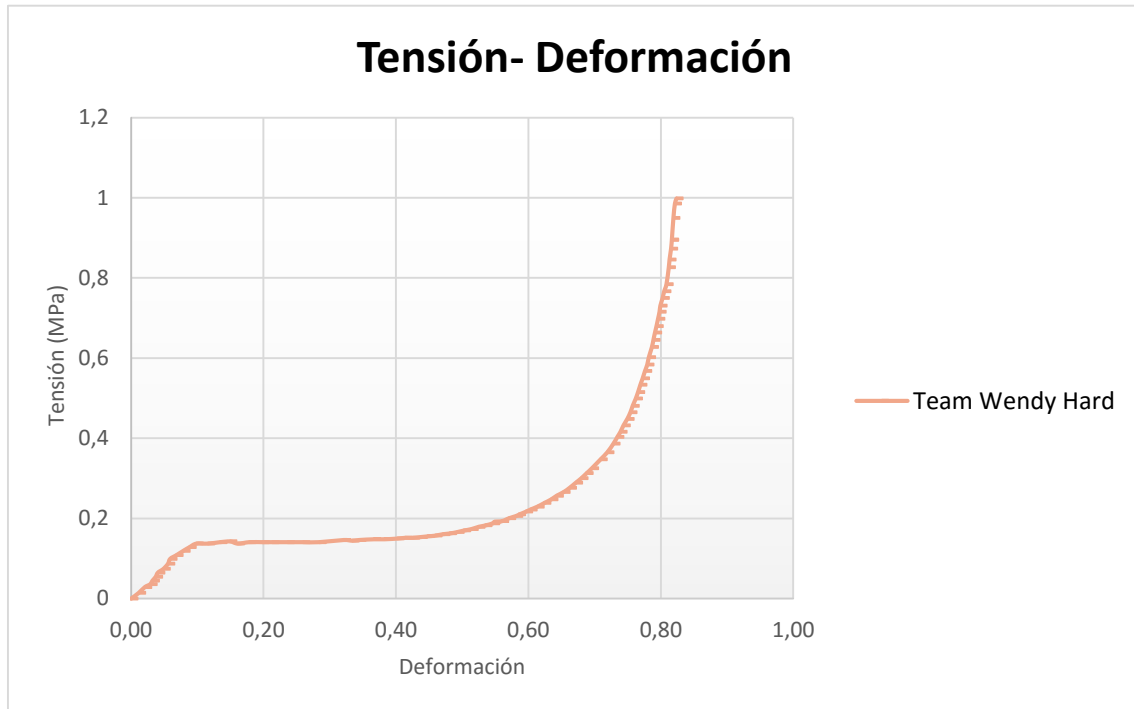


Ilustración 47. Espuma Team Wendy Hard gráfica tensión-deformación.

6. Resultados

6.1. Análisis de la sensibilidad de mallado.

Una vez se ha definido el modelo, los materiales, y las condiciones de contorno (velocidades, limitaciones de movimiento...) se necesita dividir el elemento en otros más pequeños donde el comportamiento de éstos pueda ser aproximado a una ecuación lineal.

Por un lado, se puede suponer un tamaño de elemento pequeño, en este caso la solución podría converger a un resultado concreto. En este caso la respuesta aportada por ABAQUS será bastante próxima a la realidad, ya que el comportamiento en pequeñas dimensiones es bastante más lineal que en el caso de elementos grandes, donde el comportamiento real es mucho más complejo que el simulado y aproximado a una función lineal.

Sin embargo, los costes de computación pueden llegar a ser bastante importantes en el estudio ya que se requiere mayor potencia de cálculo con los costes que ello conlleva.

Por otro lado, se encuentra la situación en la que el tamaño de los elementos es grande. En este caso los costes de cálculo son bastante bajos pero la solución puede estar bastante lejos de lo que pasa en realidad.

Es por ello por lo que es importante conseguir un punto intermedio entre ambas, para que de esta manera salga rentable hacer el estudio. Para ello se ha tomado como referencia el Airex 82.60 y se imponen distintos tamaños de elementos. Este equilibrio se ha intentado conseguir de la siguiente forma:

- Mallado de 2 mm. Este mallado consta de elementos cúbicos formados por 2mm de lado. Este tipo podría abarcar un importante tiempo de cálculo, donde la solución de la fuerza sobre la placa en función del tiempo es la siguiente.

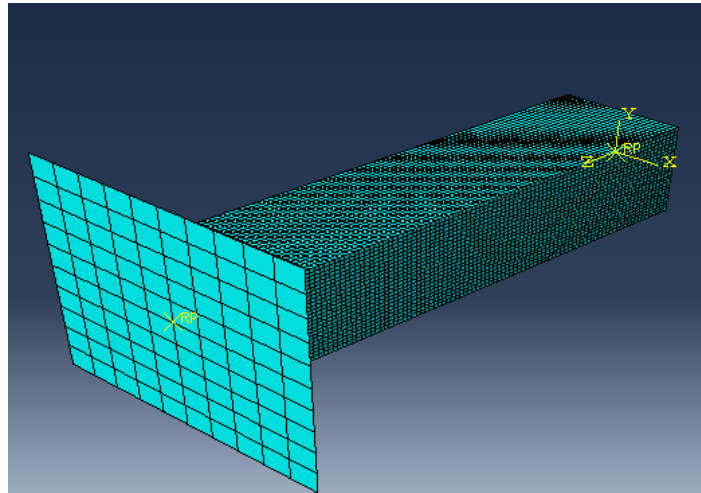


Ilustración 49. Solución dada con mallado de 2mm

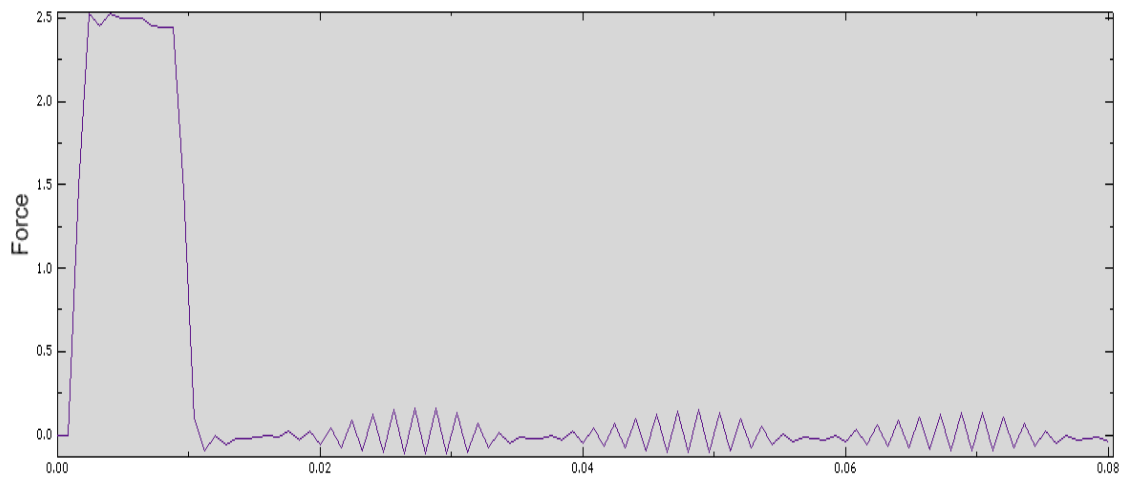


Ilustración 48. Resultados de la fuerza con un mallado de 2mm

- Mallado de 4 mm. En este caso los elementos son cubos de 4mm de lado. Para resolver este mallado la potencia de cálculo no es tan elevada.

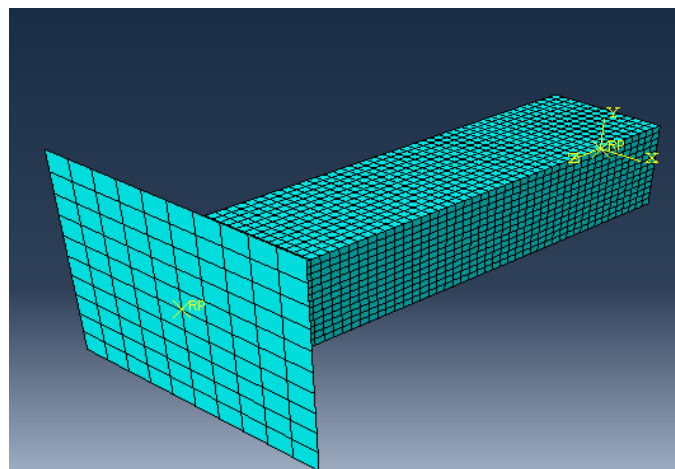


Ilustración 50. Solución dada con un mallado de 4mm

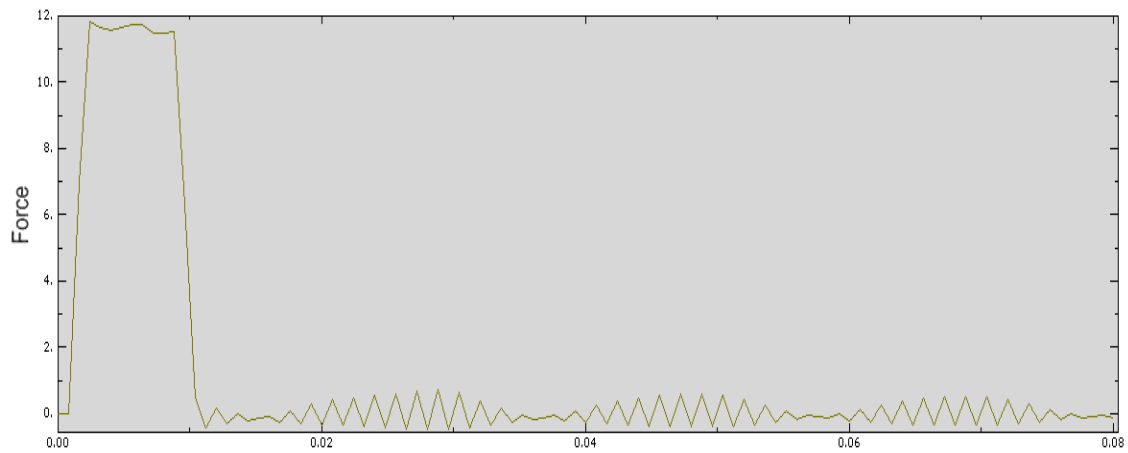


Ilustración 51. Resultados de la fuerza con un mallado de 4mm

- Mallado de 8 mm. La matriz está formada, esta vez, por cubos de 8mm de lado. Como se puede apreciar en la imagen, esta vez el cálculo se distancia bastante de la solución inicial de 2mm

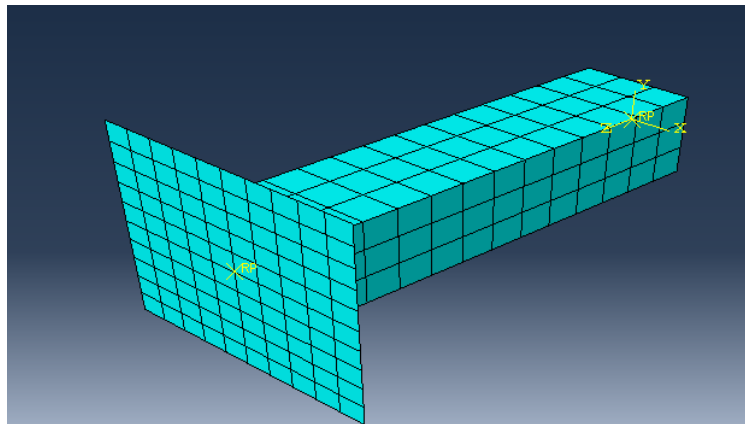


Ilustración 53. Solución dada con un mallado de 8mm

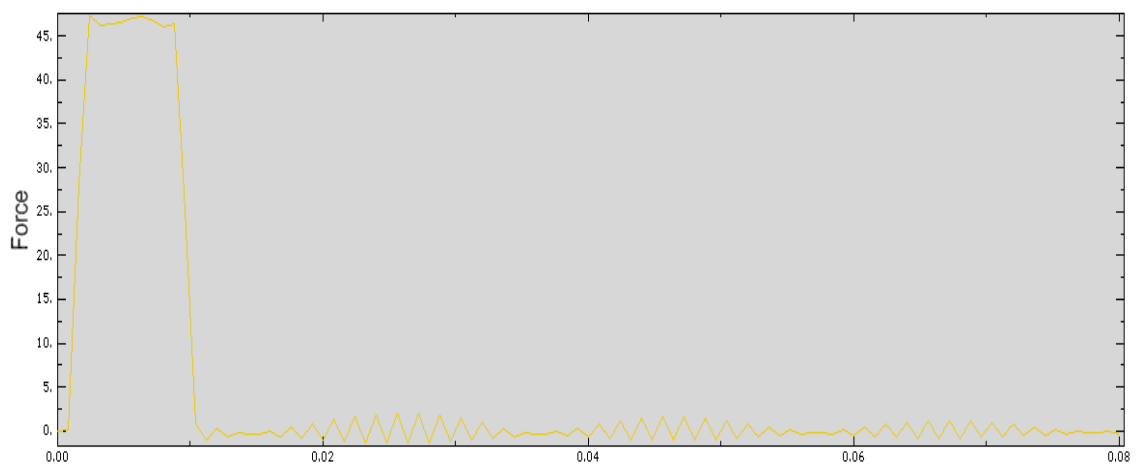


Ilustración 52. Resultados de la fuerza con un mallado de 8mm

En este caso se ha optado por un mallado de 4mm, ya que está en el equilibrio entre una buena solución y un cálculo computacional asequible.

Por otro lado, no hay que perder de vista que se trata de una simulación de unas dimensiones muy pequeñas, esto quiere decir que si se pretende simular en un futuro cuerpos mayores, como puede ser un casco, se necesitará un número de elementos mucho mayores, con todo el cálculo que ello conlleva.

Con esto se quiere decir que en el caso que se vaya a hacer una simulación a tamaño real de un impacto sobre un elemento de protección, el mallado que se realizará será muy parecido al de 4mm de la figura anterior y es por ello por lo que se usará este como referencia de estudio en este trabajo.

Prueba	Distancia (mm)	Fuerza Max (N)
1	2	2.5
2	4	12
3	8	45

Ilustración 54. Tabla resumen de las soluciones del mallado

6.2. HIC (HEAD INJURY CRITERION)

En esta parte del proyecto se evaluará la protección ofrecida por los distintos materiales mencionados anteriormente en caso que su fin sea la protección de la cabeza.

En este caso, la variable de la que depende este daño es la aceleración, pero no como tal, sino operando con este valor para obtener el HIC.

6.2.1. Airex

6.2.1.1. Airex 82.60

Se comenzará analizando la espuma Airex 82.60. Este material genera una curva de aceleración en el impactador, como muestra la ilustración 55, pronunciada al inicio

(momento en el que se produce el impacto) y poco se va suavizando hasta llegar al punto de aceleración 0.

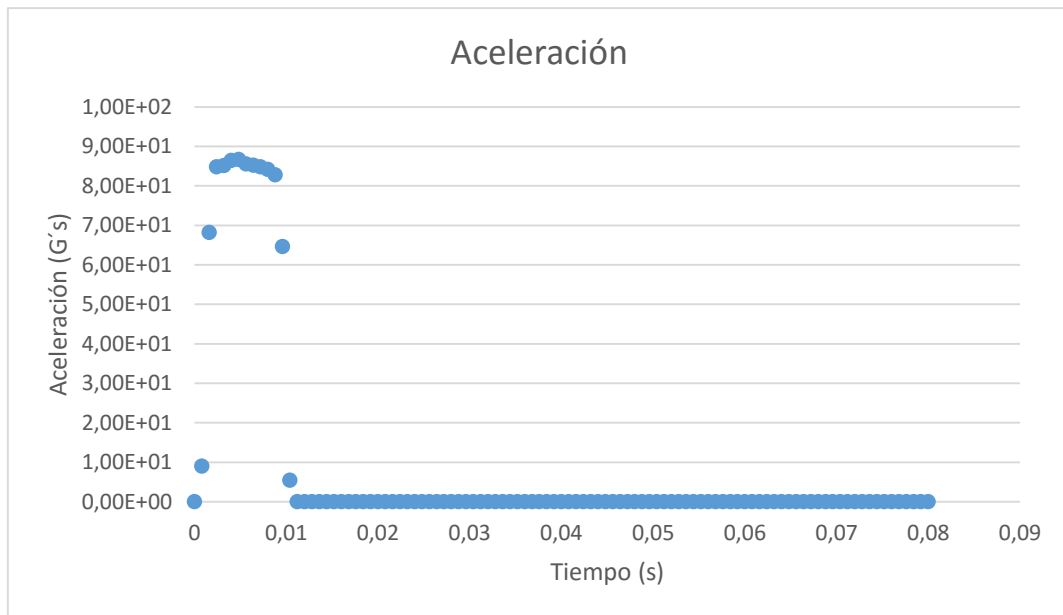


Ilustración 55. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Airex 82.60

Una vez que se haya finalizado el ensayo, el comportamiento elástico de la espuma hace que permanezca un tiempo oscilando hasta que la energía se disipe totalmente en esos movimientos de vaivén. Estas pequeñas oscilaciones, como cabe esperar, no influyen significativamente en el daño ocasionado por el impacto, por tanto, el valor que debe interesar está en torno a ese valor de aceleración máxima.

Como el criterio de elección del HIC es el máximo de la fórmula mostrada anteriormente se tomará el HIC en ese tiempo de aceleración máxima. De esta manera, se puede comprobar que efectivamente esas oscilaciones posteriores no afectan al valor máximo del HIC.

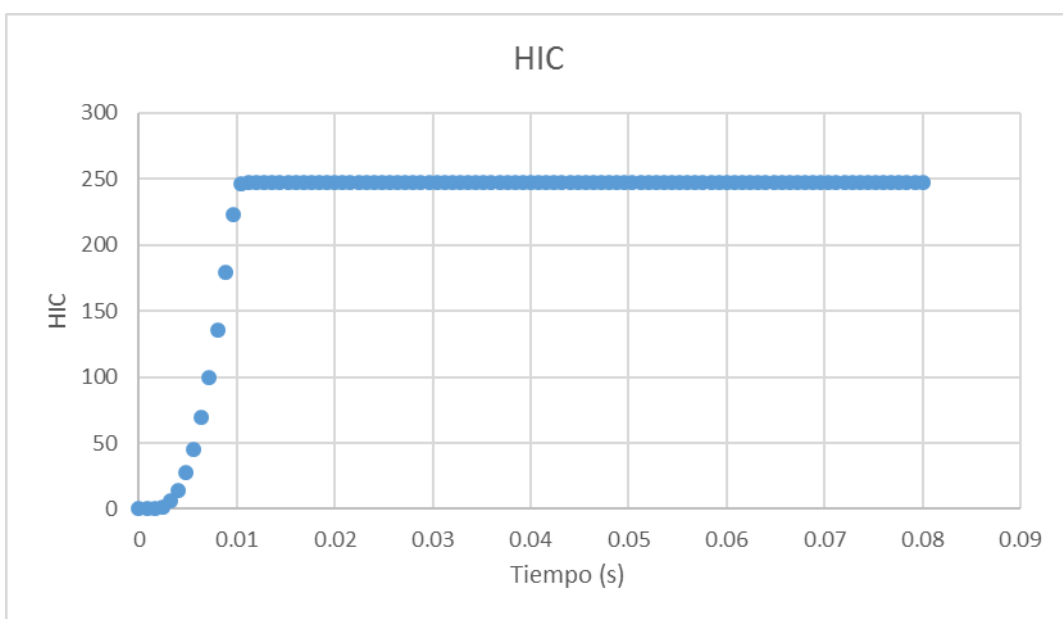


Ilustración 56. Curva del HIC producida por la espuma Airex 82.60

Como se puede apreciar en la imagen anterior el HIC máximo tiene un valor de 248, y corresponde cuando el tiempo transcurrido es aproximadamente igual a 0.01s. Sin embargo, la aceleración máxima está en torno a $t=0.005s$, donde el HIC es 46.

6.2.1.2. Airex 82.80

Se continuará analizando la otra espuma del modelo Airex, más concretamente la 82.80. A diferencia de la espuma anterior ésta tiene una mayor densidad, por lo que se espera que tenga un comportamiento más rígido frente a impactos.

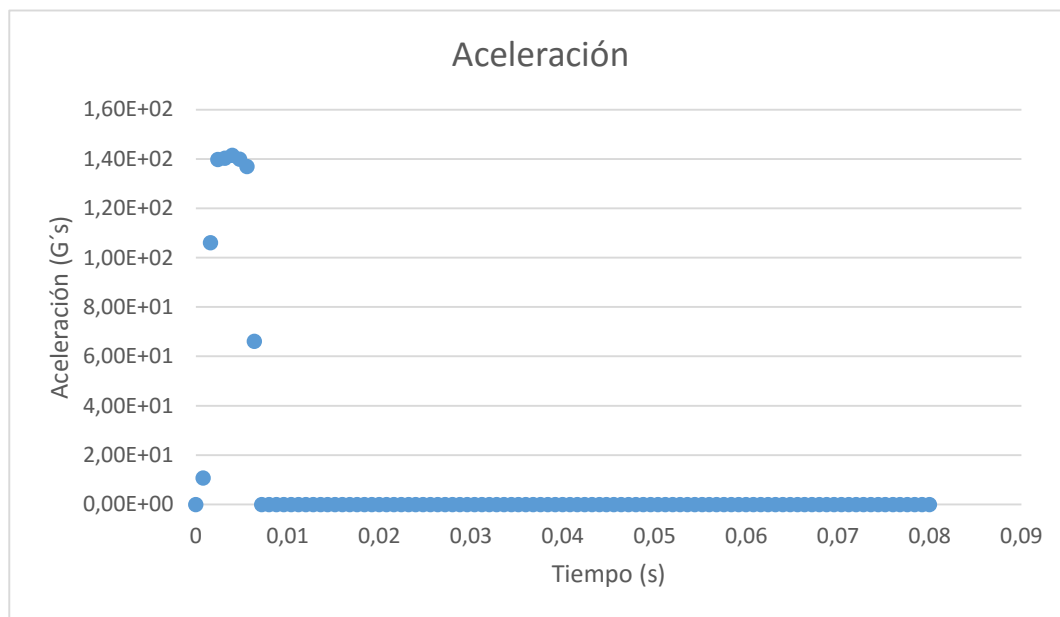


Ilustración 57. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Airex 82.80

Como se puede ver en la ilustración 57, el valor máximo de aceleración es mayor que en el caso anterior, pero en un corto periodo de tiempo.

Al igual que en la espuma Airex 82.60, ésta también genera unas oscilaciones al realizar el impacto, y al igual que anteriormente son despreciables, ya que no generan un daño en comparación con el golpe inicial.

A priori se podría pensar que al tener una mayor aceleración este segundo material tendrá un comportamiento peor que el anterior frente a impactos.

Y efectivamente, como se puede comprobar, el HIC de esta espuma tiene un valor de 90 en el instante de tiempo donde la aceleración es máxima, superior al caso de la espuma menos densa.

También se debe tener en cuenta que no influye tanto el valor máximo de aceleración, sino el tiempo al que se esté expuesto. En este caso se puede apreciar cómo se tiene una aceleración pico mayor y el tiempo de exposición es aproximadamente igual que en el otro caso, lo que supone un valor del HIC superior.

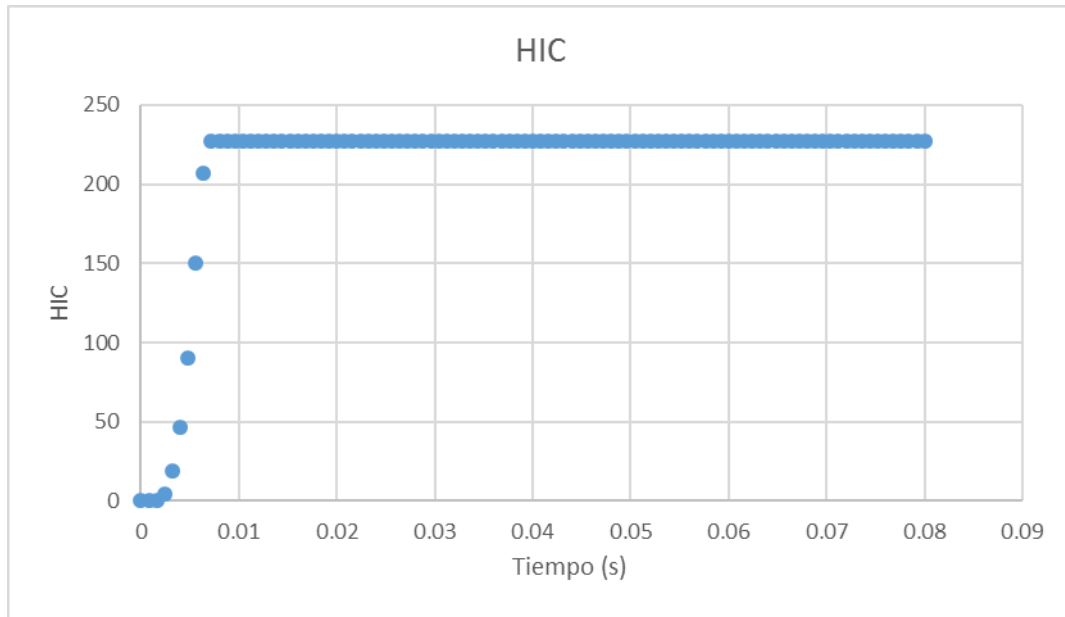


Ilustración 58. Curva del HIC producida por la espuma Airex 82.80

6.2.2. Corcho Aglomerado

Realizando un análisis previo a la simulación, en este caso con corcho aglomerado, se podría pensar que este material es aún más rígido que los dos anteriores, provocando así unas aceleraciones bastante grandes.

Esto se debe a que la curva tensión-deformación está muy por encima la de la espuma Airex 82.80. Consecuentemente, se puede decir que la espuma tenderá a deformarse mucho menos si se le aplica una carga.

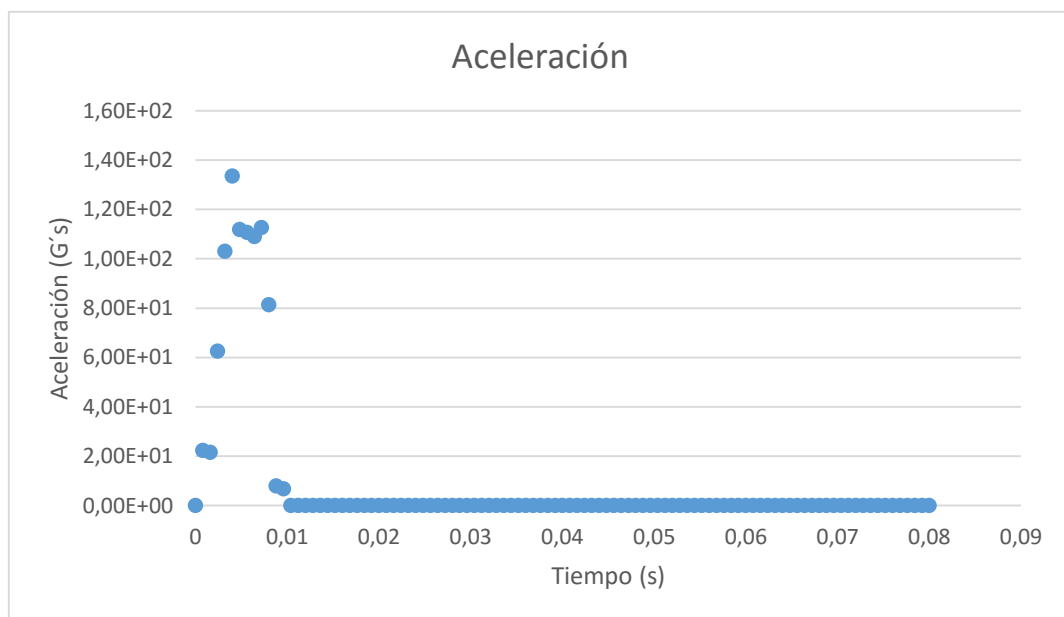


Ilustración 59. Curva de resultados de la aceleración del corcho aglomerado

Debido a esa rigidez del material, la curva de aceleración descrita por la espuma es más pronunciada, teniendo incluso un pico bastante marcado en la zona de aceleración máxima.

La curva de aceleración generada por el corcho aglomerado, dibuja un comportamiento similar al de la espuma Airex 82.80, con un valor máximo menor pero que es poco influyente en el HIC ya que se produce en un período de tiempo muy corto como se puede comprobar en la ilustración 59.

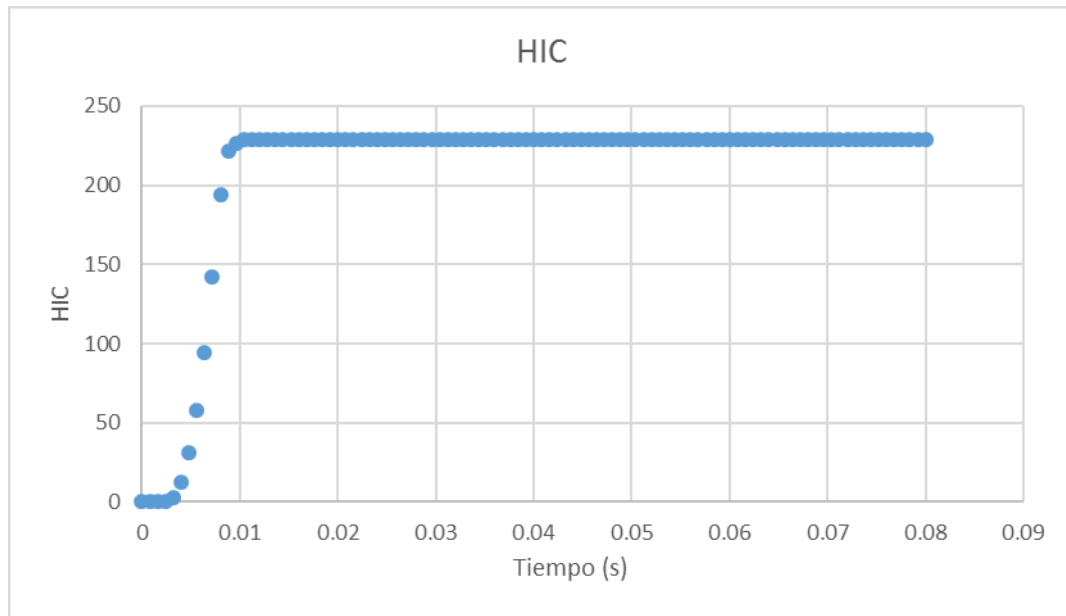


Ilustración 60. Curva del HIC producida por el corcho aglomerado

En este caso el valor del HIC, en el instante de aceleración máxima, es de 32 e inferior al de la espuma Airex 82.80, debido al incremento de aceleración que posee este material en comparación con la espuma Airex, y la poca influencia que tiene por ser producido en un intervalo de tiempo muy pequeño.

6.2.3. Riddell

6.2.3.1. Riddell Soft

Esta vez se comenzará a analizar la espuma Riddell, más concretamente, la parte blanda de la almohadilla. Si se analiza la curva de este material se puede ver que tiene un comportamiento claramente menos rígido que en los casos anteriores estudiados.

Como consecuencia, se espera una curva de aceleración mucho más uniforme, y distribuida a lo largo del tiempo, con un valor pico considerablemente menor a los casos anteriores.

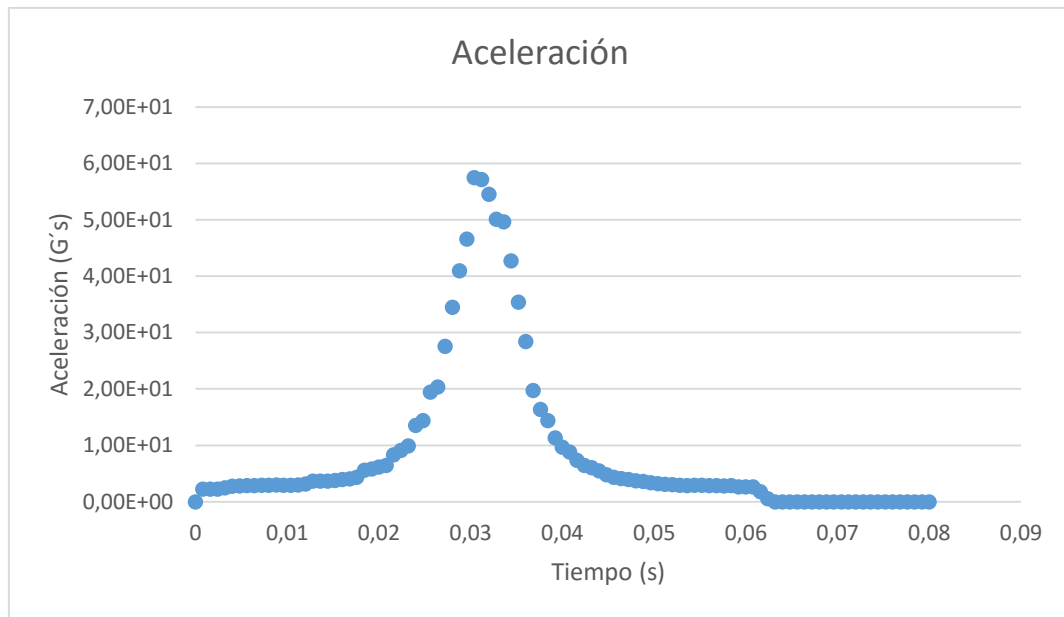


Ilustración 61. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Riddell Soft

Una vez vista la curva que describe el material, se puede decir que no se ve esa distribución uniforme de la aceleración como se esperaba, y es que el material tiene un comportamiento tan blando que en realidad empieza a frenar la placa es en la zona de endurecimiento.

Éste fenómeno tiene tal importancia que en un pequeño periodo de tiempo produce estas aceleraciones. Como cabría esperar, este material tiene un pico de aceleración inferior a los materiales más duros, sin embargo, es significativo en un material tan blando debido a ese endurecimiento.

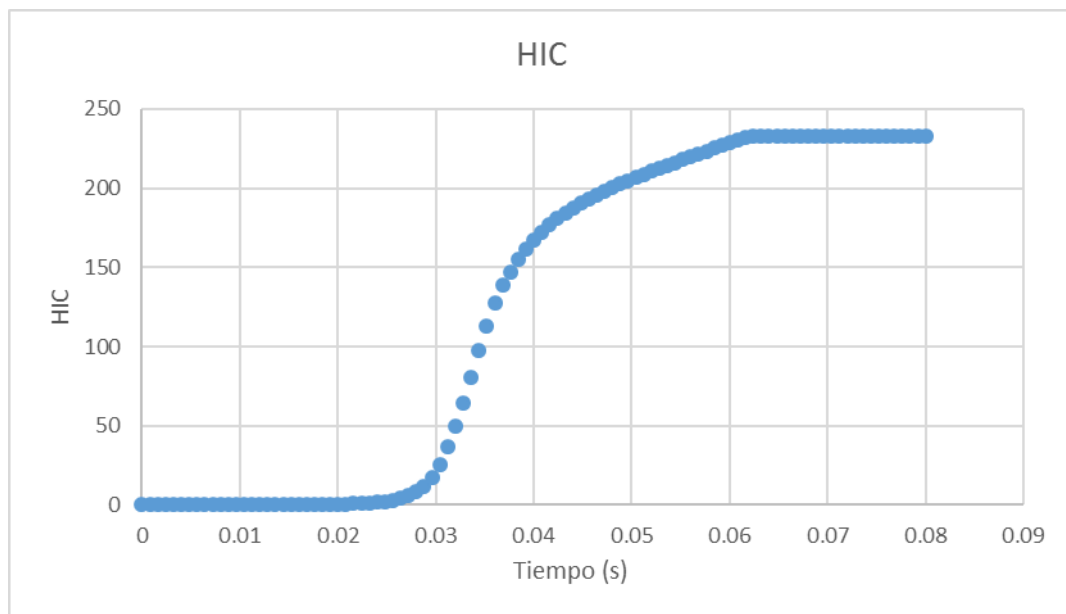


Ilustración 62. Curva del HIC producida por la espuma Riddell Soft

Como se puede comprobar en la imagen anterior, esta densificación hace que la espuma tenga un HIC por debajo de los casos anteriores, tomando un valor de 26. Además, se recomienda que, si se pretende obtener un valor menor, hay que delimitar la deformación de la espuma a la zona central de la curva, es decir sin llegar a ese pico de densificación brusco.

6.2.3.2. Riddell Hard

Analizando la parte más dura de la almohadilla, se podría esperar un peor comportamiento, ya que generaría aceleraciones mucho mayores.

Sin embargo, hay que tener en cuenta en el caso anterior de espuma Riddell, el material llegó a la zona de endurecimiento, lo que conlleva a unos valores de aceleración considerablemente altos.

Por este motivo, y viendo la curva de aceleración del material, se puede decir que es bastante probable que este material tenga un HIC inferior al anterior (en torno a 19)

Con respecto a la curva de aceleración, se puede ver como se distribuye de forma razonablemente uniforme a lo largo de tiempo, siendo además su pico de aceleraciones máxima mucho menor que en los anteriores materiales.

Concretamente como se puede apreciar en las ilustraciones 63 y 64, este material no llega a esa zona de endurecimiento brusco y va frenando poco a poco la placa del impacto.

Cabe destacar el comportamiento óptimo de esta espuma en este ensayo, ya que actúa de forma prácticamente ideal para un impacto de estas características.

Esto es porque absorbe la energía del material moviéndose en la “zona valle” de su curva tensión-deformación, sin llegar a la zona de densificación, donde las aceleraciones aumentan bruscamente.

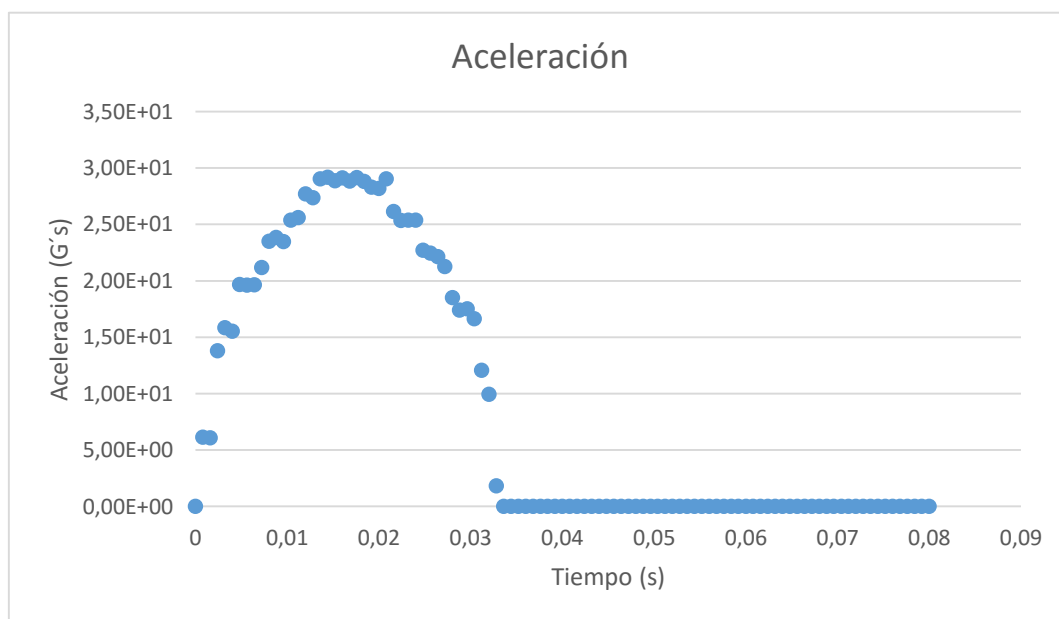


Ilustración 63. A Curva de resultados de la aceleración de la espuma Riddell Hard

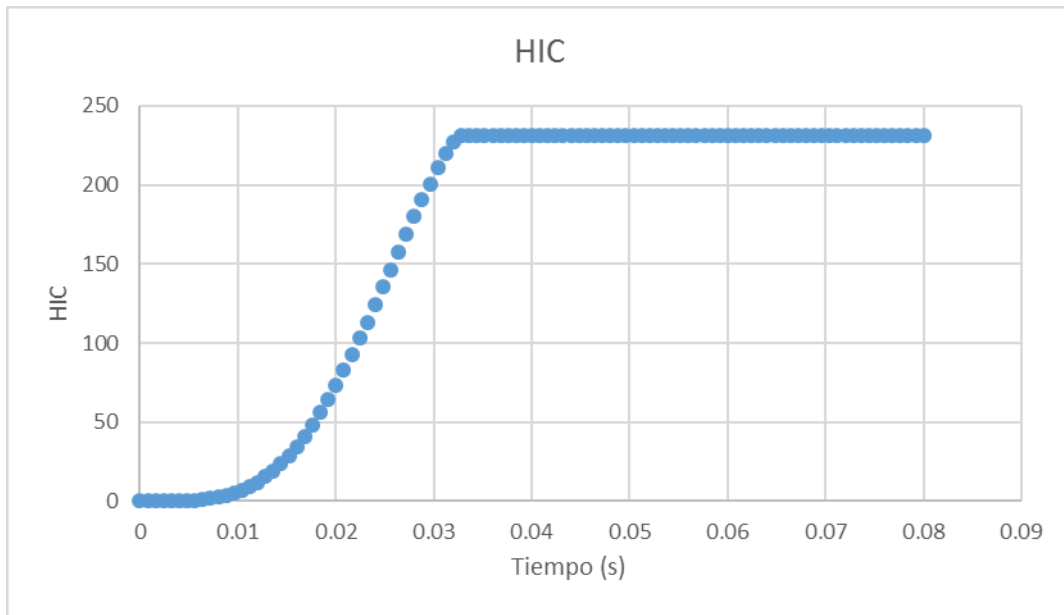


Ilustración 64. Curva del HIC producida por la espuma Riddell Hard

6.2.4. Rohacell

Continuando con el análisis, se propone la espuma Rohacell, la cual tiene una curva de endurecimiento superior a la de Riddell Hard y Riddell Soft.

En la representación de la aceleración se puede ver claramente cómo el valor máximo ronda el intervalo de aceleraciones relativamente altas, lo que lleva a pensar que al igual que en el caso de la espuma Riddell soft, llega a la zona de endurecimiento, pero con una progresión mucho más suavizada.

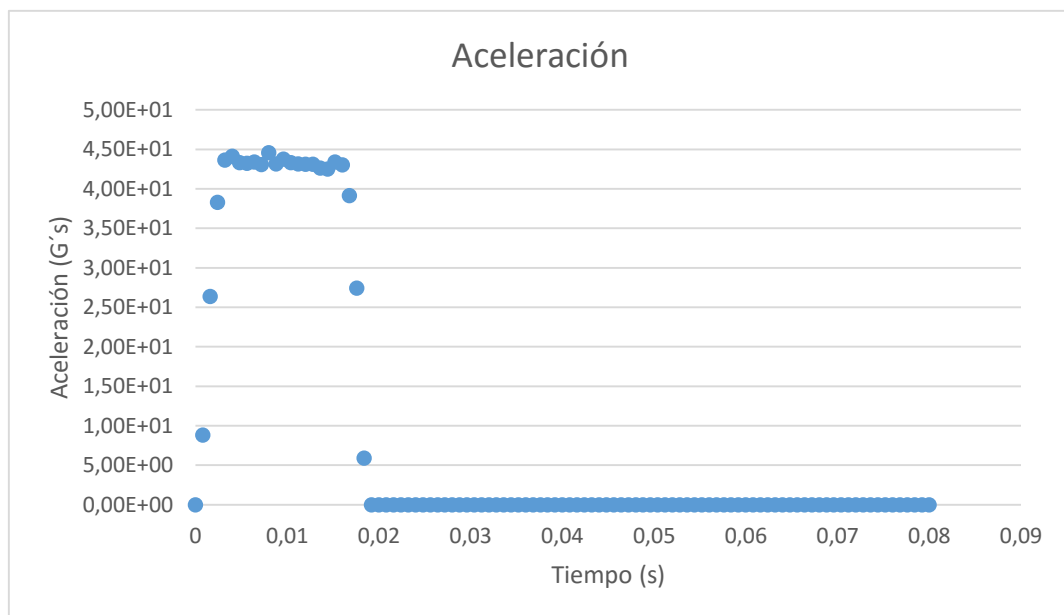


Ilustración 65. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Rohacell

Esto es lo que justifica que el valor máximo de aceleración alcanzado sea menor que el de la Riddell Soft, siendo ésta última mucho más blanda en primera instancia, pero llegando a una zona de densificación en la cual la aceleración crece drásticamente.

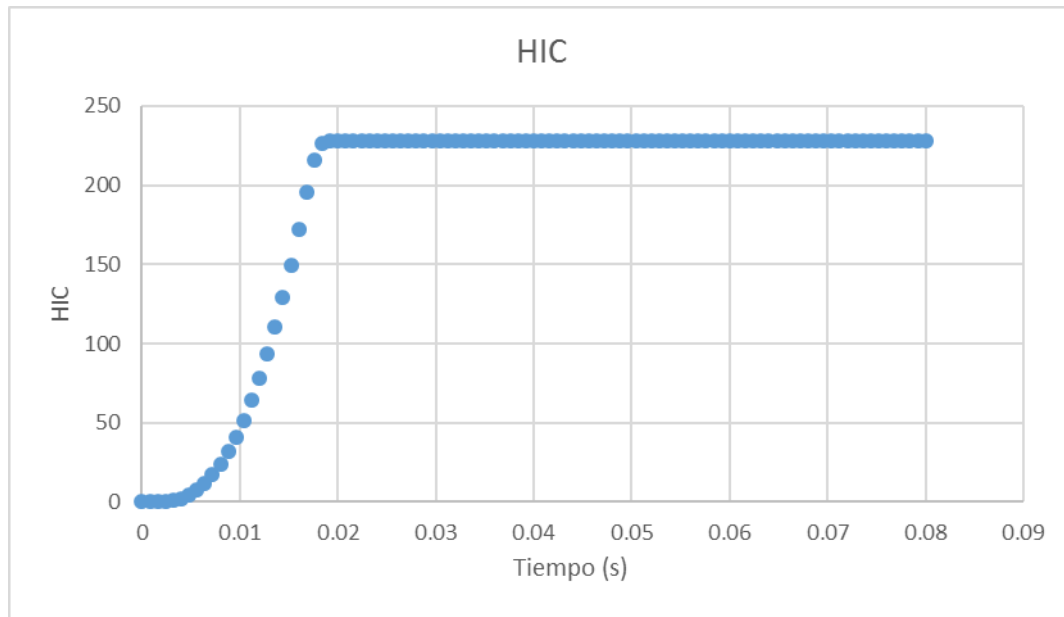


Ilustración 66. Curva del HIC producida por la espuma Rohacell

En este caso es difícil definir cuál es el punto de aceleración máxima ya que existe una zona en la que ésta es prácticamente constante, si bien es cierto que numéricamente se produce una aceleración pico en el instante $t=0.008$, que se correspondería con un valor del HIC de 24; sin embargo, el estar expuesto a una desaceleración prolongada aumenta el HIC, tomándose en estos casos la media en ese intervalo de tiempo. Para este tramo concreto el HIC toma un valor de 80.

Parece razonable pensar que, al tener un cierto endurecimiento al final de la deformación, tenga un HIC superior al de la espuma Riddell Hard, e inferior al de la Riddell Soft, ya que la Rohacell, tienen como propiedad, un endurecimiento final ligeramente más suavizado. Sin embargo, donde recae todo el peso es en el tiempo de exposición siendo este mucho mayor que en los casos anteriores.

6.2.5. Oregon

Como ya se ha explicado con anterioridad, la espuma Oregon, al igual que la Team Wendy o Riddell, está compuesta por una espuma blanda y otra más dura en su interior. Debido a que resulta imposible separarlas y no influir en su comportamiento mecánico, se ha tratado como una única espuma con los siguientes resultados.

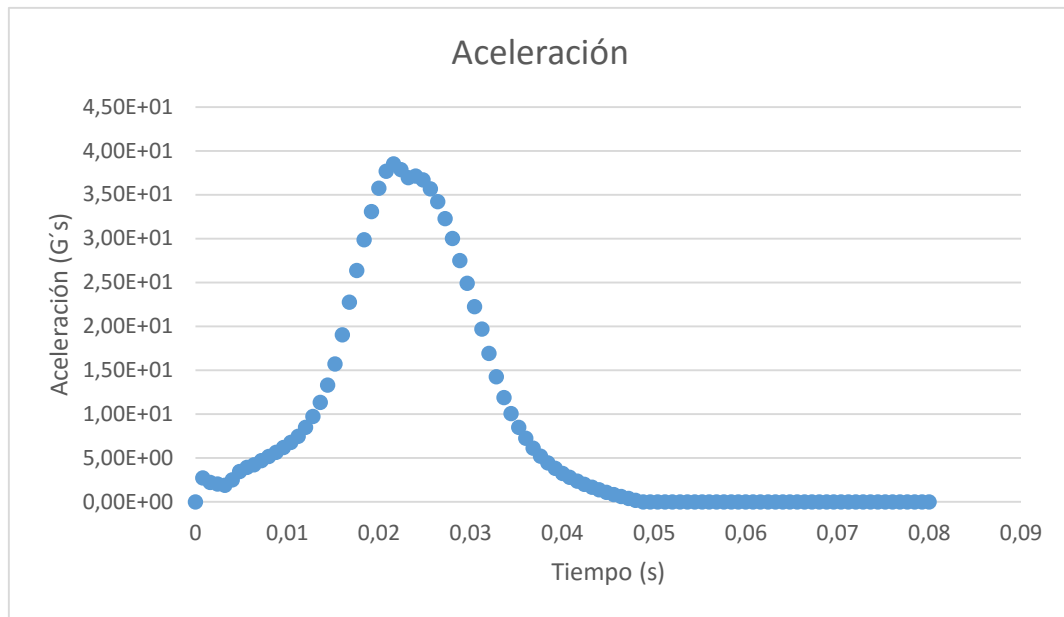


Ilustración 68. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Oregon

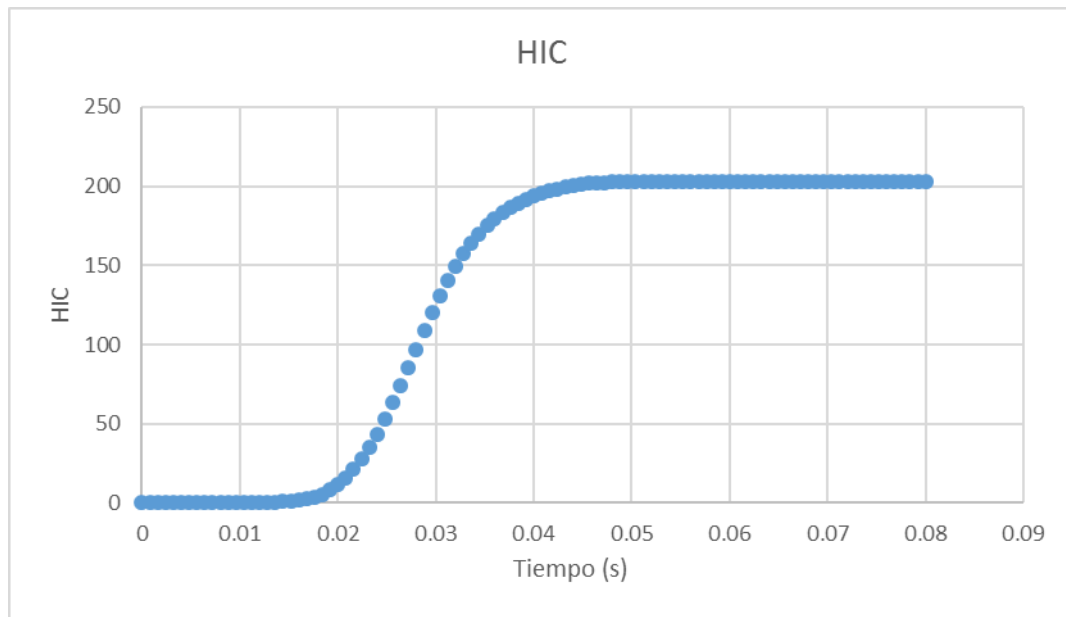


Ilustración 67. Curva del HIC producida por la espuma Oregon

A pesar de que la almohadilla está formada por una espuma blanda y otra dura, tiene un pico de aceleración bastante pronunciado. Sin embargo, el valor de éste es relativamente bajo en comparación con el resto de materiales empleados.

En este caso cobra especial importancia el tiempo de exposición de la aceleración lo que da lugar a un HIC igual a 22.

Aunque se haya conseguido un HIC bajo se puede decir que con un menor tiempo de exposición este índice disminuiría considerablemente ya que el pico de aceleración máxima no es excesivamente alto.

6.2.6. Team Wendy

6.2.6.1. Team Wendy Soft

Para finalizar el estudio de HIC, se analizará el comportamiento de las espumas Team Wendy. En primer lugar, se hará con la parte más blanda, la cual tiene una curva de tensión-deformación de valores inferiores a la espuma Oregon.

La curva de aceleración responde a la definida en el siguiente gráfico.

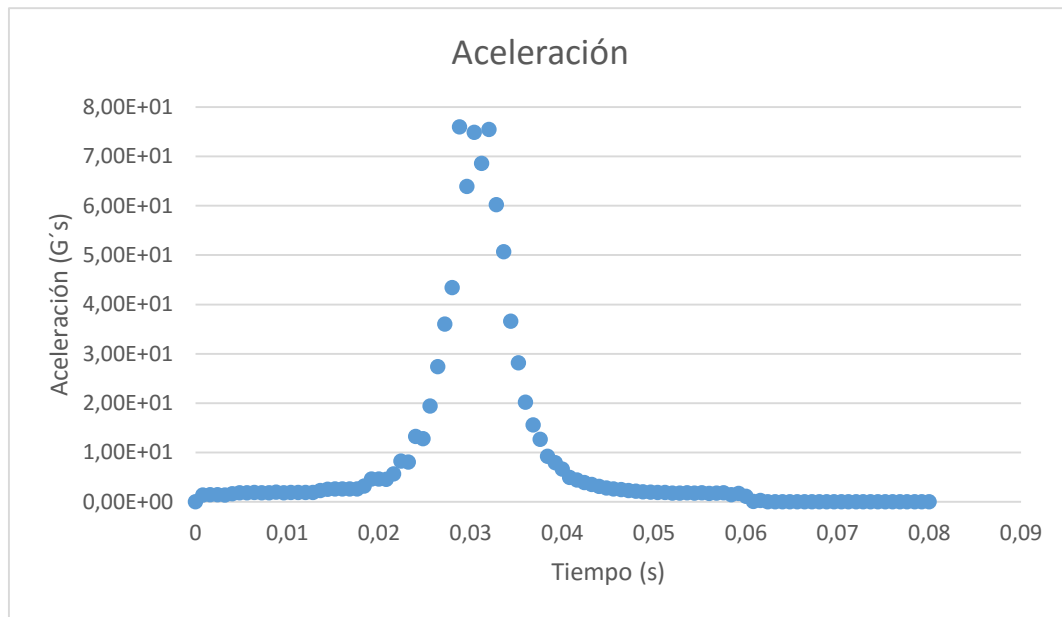


Ilustración 69. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Team Wendy Soft

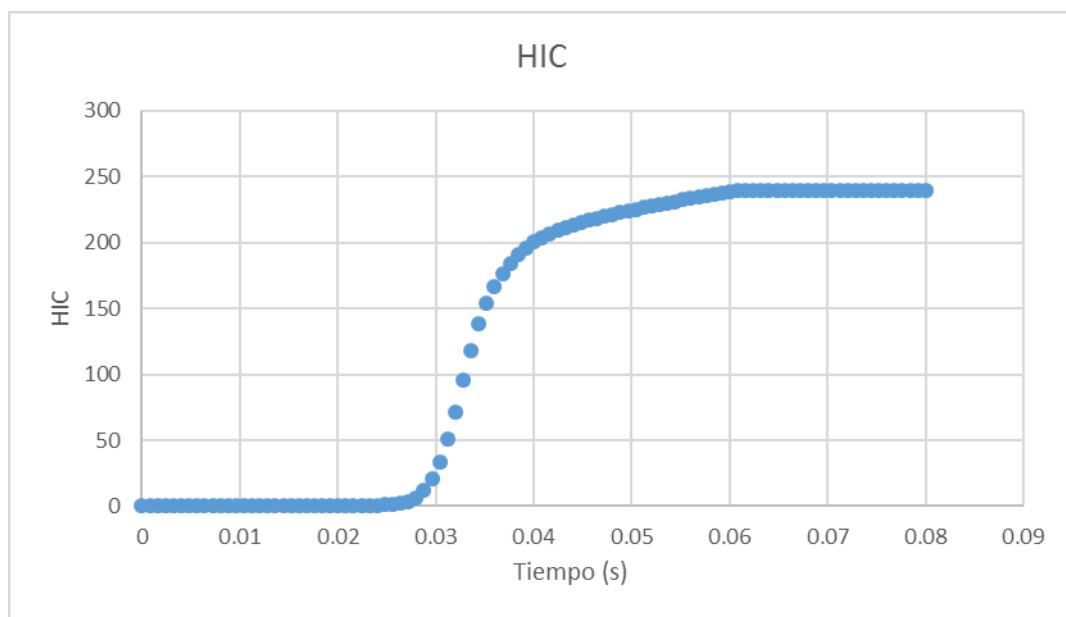


Ilustración 70. Curva del HIC producida por la espuma Team Wendy Soft

Como se puede apreciar en la ilustración 69, existe un valor de aceleración máxima bien definido y está en torno a un valor de $t=0.0032$.

También se puede ver que la curva está desplazada hacia la derecha por lo que se puede decir que estos valores de aceleración se producen al final del ensayo.

Teniendo estas dos premisas, se puede afirmar que la espuma trabaja en la zona de endurecimiento o densificación.

Este endurecimiento hace que la espuma se convierta de golpe en una espuma muy rígida y le transmita a la placa unos valores de aceleración bastante altos. Respecto al desplazamiento producido, tiene mucho sentido y es que en todo ese tiempo transcurrido antes de que se produzcan las aceleraciones la espuma está trabajando en zona elástica o “zona valle”.

En este caso concreto el valor del HIC, en el instante de máxima aceleración ($t=0.032s$), es 72. A pesar de que es un material blando tiene un HIC bastante elevado debido a la densificación explicada anteriormente.

6.2.6.2. Team Wendy Hard

Finalmente, el último material a tratar es la espuma del Team Wendy Hard. Debido a que esta espuma está extraída de la parte más dura de la almohadilla, cabe esperar un comportamiento más rígido que en el caso anterior.

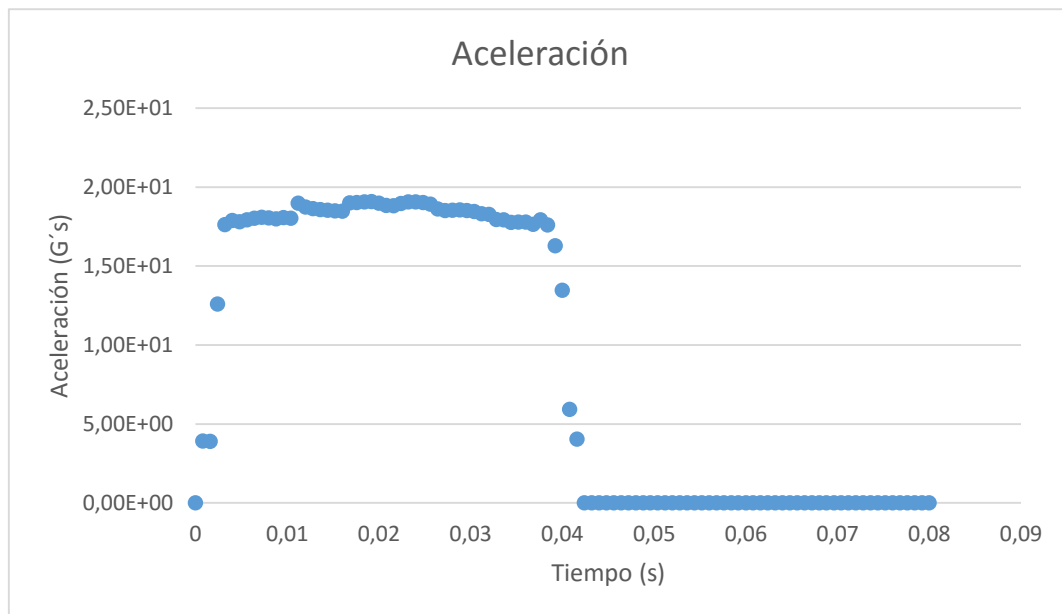


Ilustración 71. Curva de resultados de la aceleración de la espuma Team Wendy Hard

La ilustración de la aceleración muestra una curva bastante más uniforme que los casos anteriores, y valores relativamente bajos. Aquí se puede ver claramente la diferencia entre una espuma blanda y dura.

La espuma dura va desacelerando poco a poco la placa hasta llegar a detenerla, siendo esta desaceleración constante, en cambio la espuma blanda tiene que llegar a la zona de densificación para poder detener el impactador.

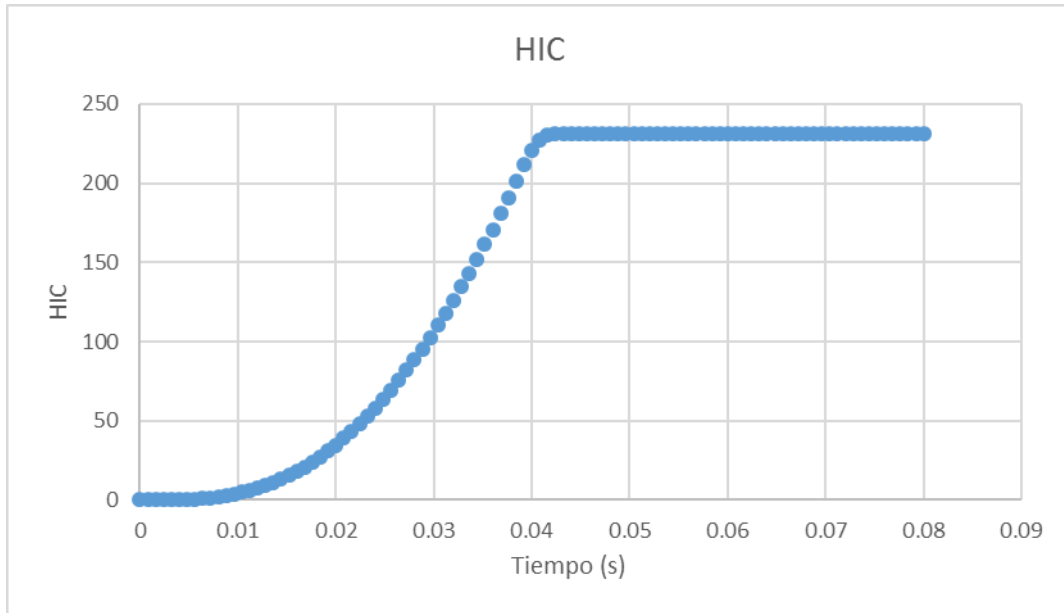


Ilustración 72. Curva del HIC producida por la espuma Team Wendy Hard

En este caso al igual que en el caso de la espuma Rohacell, es necesario realizar la media en este intervalo de tiempo donde la aceleración es máxima, quedando un valor de 62.

Es cierto que este intervalo de tiempo es mucho mayor que en el caso de la espuma Rohacell, sin embargo, el valor de la aceleración es mucho menor, lo que conlleva a un valor de daño inferior.

6.2.7. Comparación de resultados con las curvas

Una vez ensayados todos los materiales, y habiendo obtenido los resultados requeridos, se podrá hacer una comparación más precisa entre ellos. La ilustración 73 muestra la representación de las curvas tensión-deformación de cada uno de ellos.

Como se puede apreciar en la leyenda del gráfico, los materiales con menor HIC son Riddell Hard, Oregon, Rohacell y Riddell Soft. Tanto la espuma Riddell Hard como la Oregon poseen una línea de endurecimiento ascendente, lo que hace que a medida que aumenta la deformación del material, aumente su resistencia y con ello haga reducir la velocidad de la placa.

Sin embargo, las espumas Rohacell y Riddell Soft poseen un comportamiento bastante diferente al anterior, pero aun así dando valores relativamente buenos en comparación con el resto de materiales.

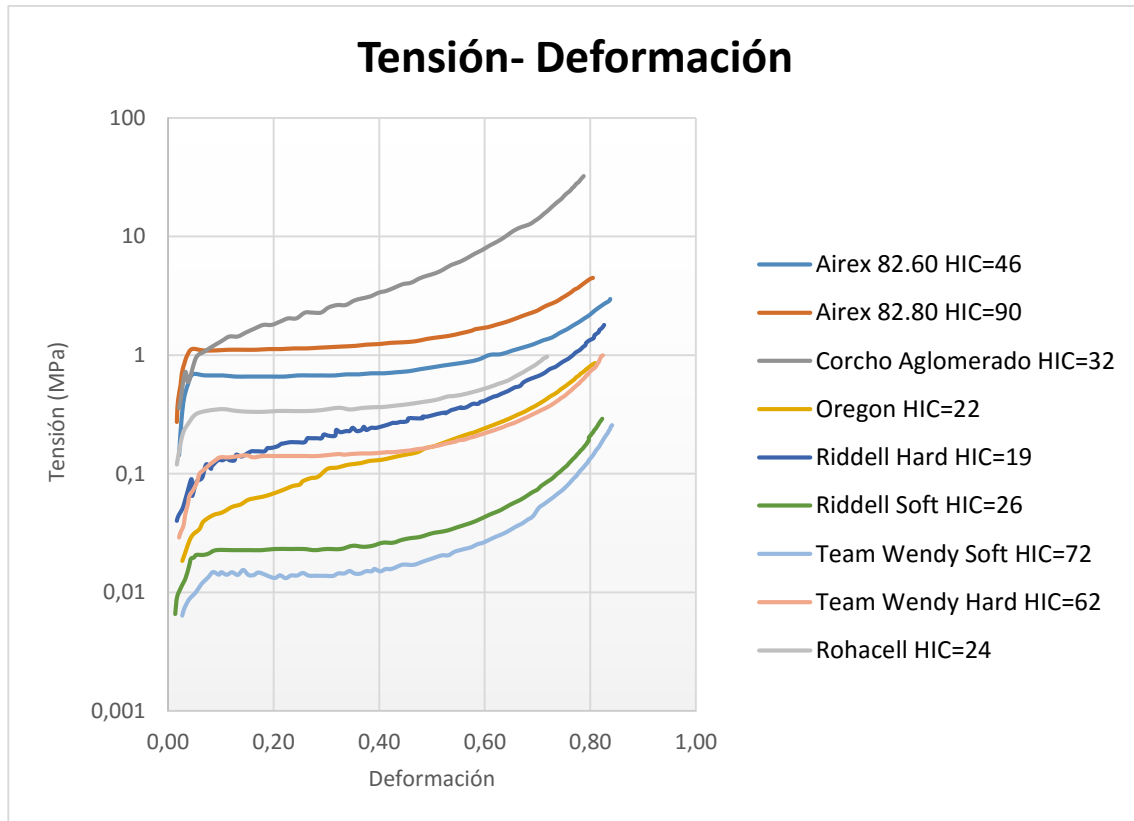


Ilustración 73. Gráfico de comparación entre los materiales empleados

Una observación a resaltar reside en los materiales Riddell Soft y Team Wendy Soft, ambos poseen curvas de tensión deformación muy similares, sin embargo, los valores del HIC varían. La respuesta a esta pregunta probablemente esté en la densidad del material. Es cierto que en la fórmula del HIC no aparece el parámetro densidad por ninguna parte, pero de este valor depende la aceleración conseguida debido a las inercias al ser un ensayo dinámico.

Además, es una prueba manifiesta de que la aceleración no es un parámetro unívoco a la hora de cuantificar el daño que pueda ser producido en un impacto en la cabeza. También son relevantes otros parámetros como el tiempo afectado; es por ello por lo que se debe calcular el HIC y aquí la importancia de este proyecto.

El resto de materiales (Airex 82.80, Team Wendy Hard, Team Wendy Soft...) presentan un HIC mucho mayor a de estos materiales, siendo de esta manera considerados menos adecuados para estas condiciones de ensayo.

La ilustración 74 muestra el orden descendente de los valores del HIC de cada material mostrando por tanto el orden de los materiales con un mejor comportamiento en la parte superior.

Clasificación	Material	HIC
1	Riddell Hard	19
2	Oregon	22
3	Rohacell	24
4	Riddell Soft	26
5	Corcho Aglomerado	32
6	Airex 82.60	46
7	Team Wendy Hard	62
8	Team Wendy Soft	72
9	Airex 82.80	90

Ilustración 74. Clasificación según el HIC generado por cada material

6.3. Absorción de energía

En este segundo estudio se dará una clasificación en función de la capacidad de absorción de energía de cada material en un momento concreto del ensayo.

Para ello se debe hacer una pequeña modificación en el modelo numérico, y es imponer una velocidad constante hasta ese determinado tiempo.

Este valor del tiempo vendrá regido por la deformación máxima que se quiera obtener. En este caso, se ha tomado un valor de $t=0.02$, que, al tener velocidad constante, se detendrá con una deformación superior al 50%.

Este valor de deformación, dará una buena aproximación de la capacidad de absorción de energía de cada material.

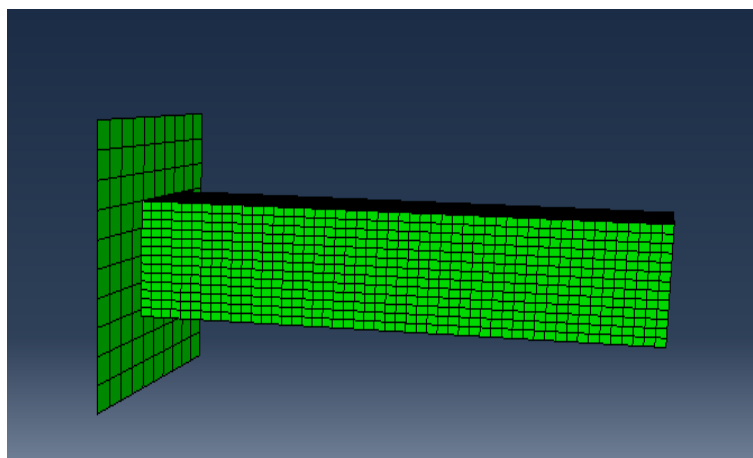


Ilustración 75. Estado inicial del segundo ensayo

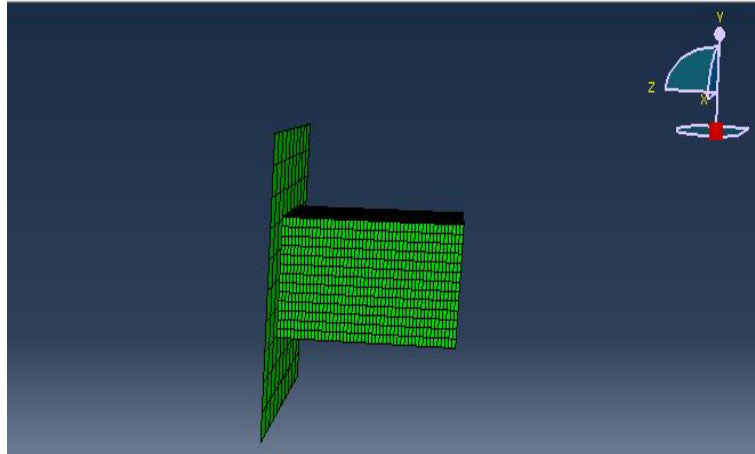


Ilustración 76. Estado final (en $t=0.02$) del segundo ensayo

6.3.1. Airex

6.3.1.1. Airex 82.60

Se comenzará de nuevo con el Airex 82.60, sabiendo que la energía absorbida es proporcional a la tensión ya que parámetros como el área de contacto o la deformación son iguales para todas las simulaciones.

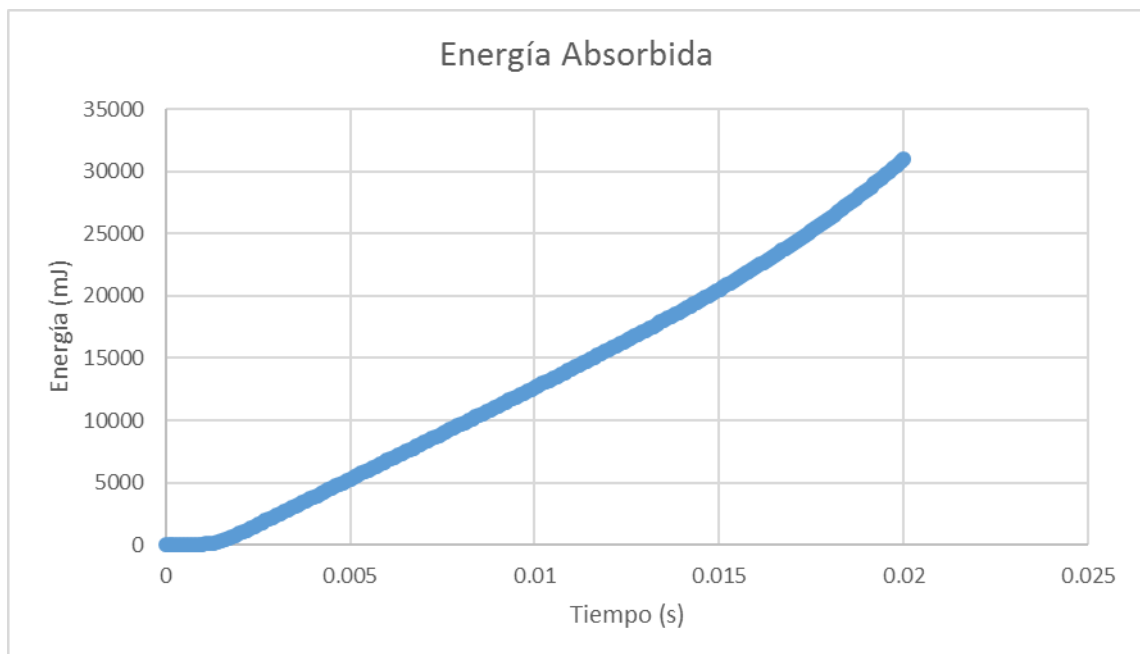


Ilustración 77. Energía absorbida por la espuma Airex 82.60

Teniendo en cuenta esto, se podría decir a priori que los materiales que más energía absorben son los más rígidos. En el caso de espumas poliméricas es bastante más

complejo ya que tienen tres zonas bien diferenciadas y el comportamiento del material en cada una de ellas puede variar radicalmente.

En este caso, se puede ver claramente cómo al inicio de la simulación el material no ofrece prácticamente resistencia y cómo poco a poco esa tensión va aumentando casi linealmente.

El valor máximo de energía absorbida en $t=0.02s$ está en torno a los 31 J.

6.3.1.2. Airex 82.80

Continuando con la secuencia de análisis, se procederá al estudio de la otra espuma de la clase Airex y es la 82.80.

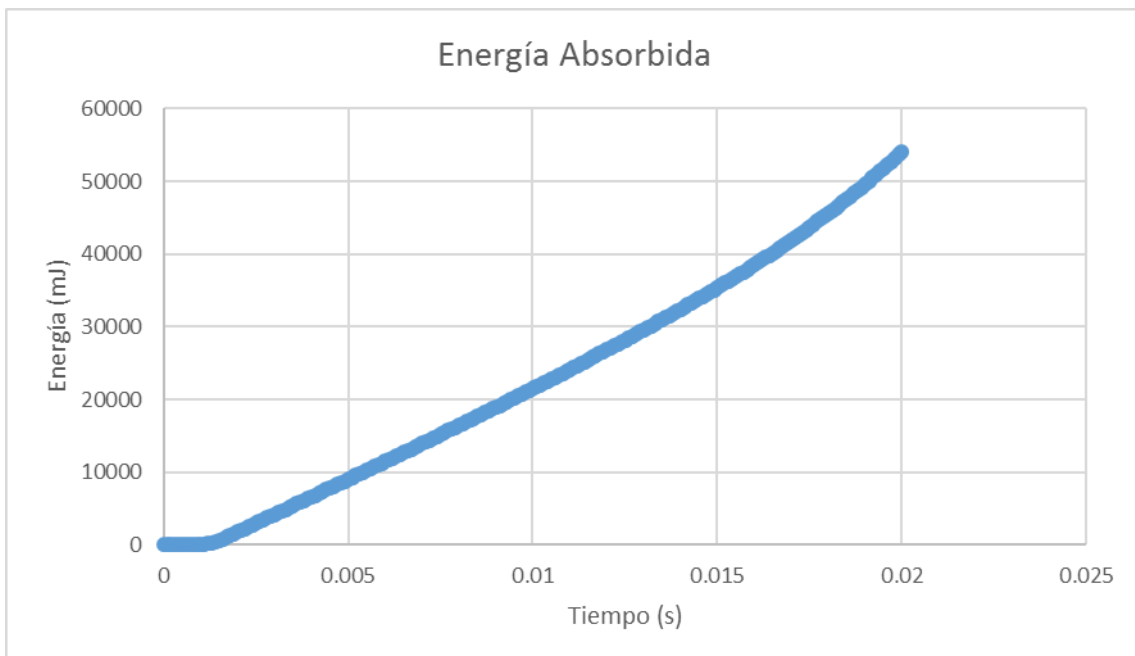


Ilustración 78. Energía absorbida por la espuma Airex 82.80

Como se puede ver en la gráfica anterior, se confirma lo dicho, y es que la espuma de mayor densidad posee una mayor rigidez. Esta rigidez hace que la tensión necesaria para deformarla sea mucho mayor, y, manteniendo las deformaciones constantes, obtener unos valores de energía absorbida superiores.

En este caso, la forma de la curva es bastante similar a la anterior, comenzando por valores muy bajos, y luego aumentar linealmente los valores de energía. Este material en concreto ha absorbido un valor máximo de energía igual a 54J en el instante de $t=0.02s$.

6.3.2. Corcho aglomerado

Cambiando el tipo de material, se pasa a la simulación del corcho. Este corcho aglomerado tiene una mayor rigidez que los materiales anteriores, por lo que es de esperar unos valores de energía muy superiores a las espumas Airex.

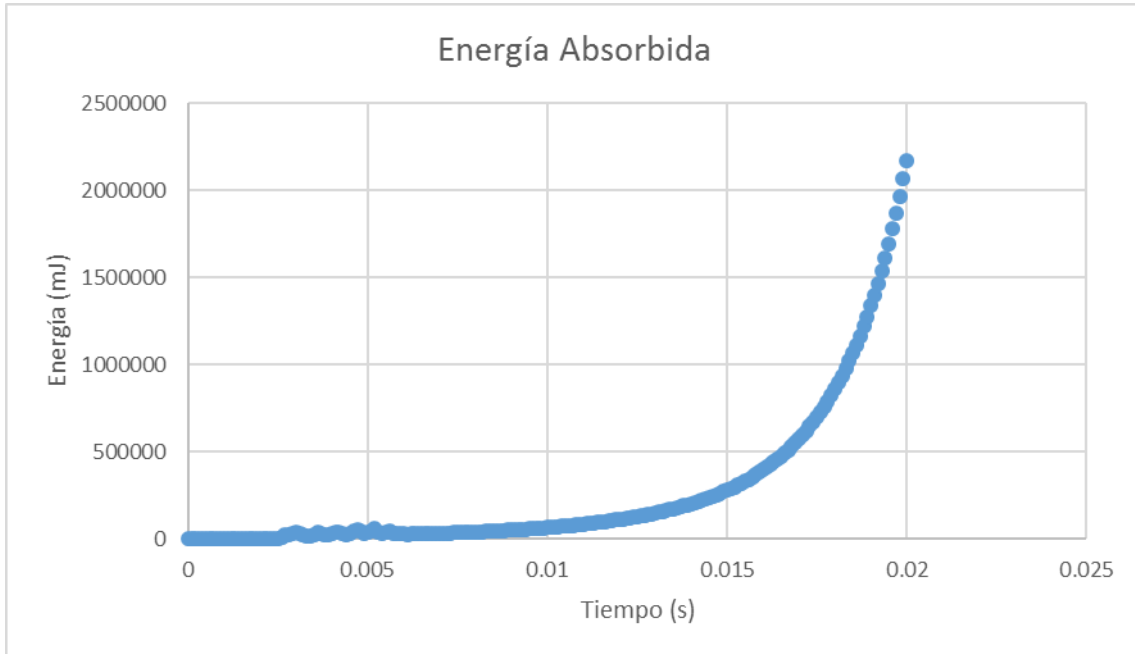


Ilustración 79. Energía absorbida por el corcho aglomerado

Pese a lo que se pueda pensar viendo la gráfica a simple vista, el corcho impone una tensión bastante elevada desde el inicio, pero la escala de los ejes hace que parezca 0 al comienzo. Por ejemplo, en $t=0.005$ el valor de la energía absorbida es de 64J.

Lo que pone de manifiesto esta gráfica es que el corcho también sufre un proceso de endurecimiento que hace despreciable la energía al principio de la simulación, llegando a alcanzar los 2170J.

La diferencia más notable de este material con respecto a los anteriores es que no describe una curva lineal, sino que es exponencial. A partir de un cierto punto, cualquier variación en la deformación se traduce en valores de energía muy altos.

6.3.3. Riddell

6.3.3.1. Riddell Soft

Posteriormente al corcho aglomerado se ha pasado a las espumas de Riddell, en concreto la más blanda de las dos expuestas.

Teniendo como antecedente las espumas Airex, se podría decir que la parte blanda de la almohadilla no será capaz de absorber tanta energía como la parte dura.

A continuación, se muestra la gráfica que describe el almacenamiento de energía del material.

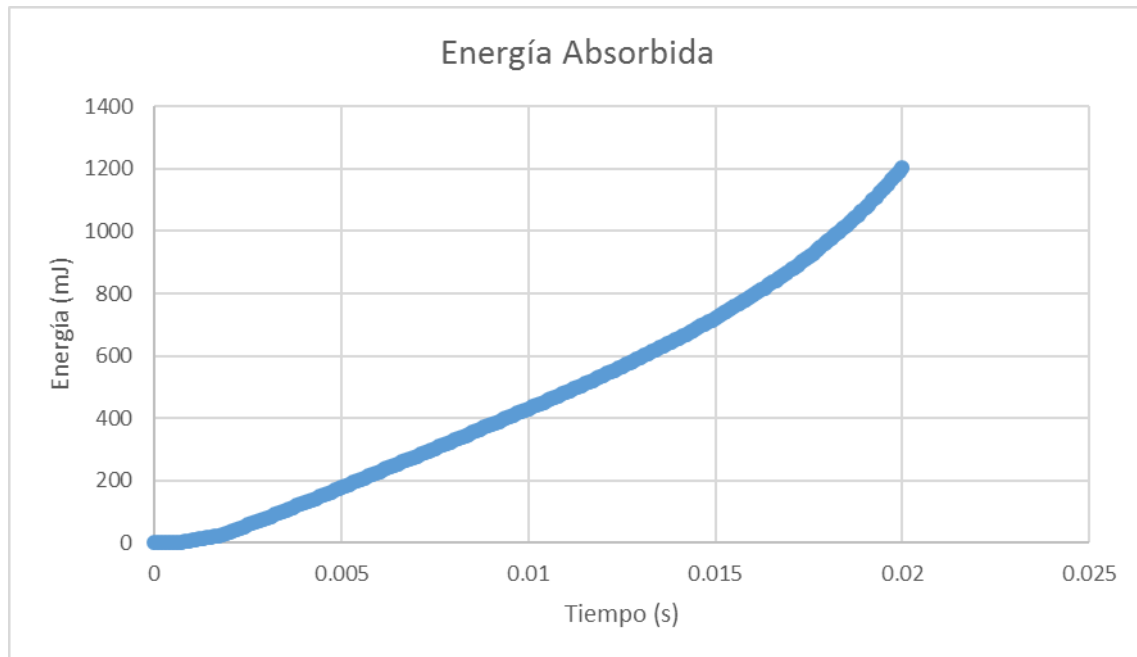


Ilustración 80. Energía absorbida por la espuma Riddell Soft

En el gráfico se puede ver una curva bastante similar a las descritas por los materiales Airex, sin embargo, los valores máximos en este último material son muy inferiores al primer caso.

Nuevamente se presenta una progresión lineal de la energía en función del tiempo, sin embargo, al final del ensayo los valores tienden a elevarse de forma más severa. Esto hace pensar que la espuma sufre un cierto endurecimiento en el tramo final de la simulación, pero despreciable en vistas a la absorción de energía. El máximo de energía absorbida está al final del ensayo con un valor de 1.2J

6.3.3.2. Riddell Hard

Poniendo como precedente de nuevo el caso del Airex, se espera, con la parte más dura de la almohadilla, un mejor comportamiento ya que de esta manera la tensión resistente aumenta, y por consiguiente aumenta la energía.

Efectivamente en este gráfico se puede comprobar que, pese a que tiene la misma forma que el material anterior, los valores en cada instante de tiempo son mayores, gracias a ese aumento de la rigidez proporcionado por el material.

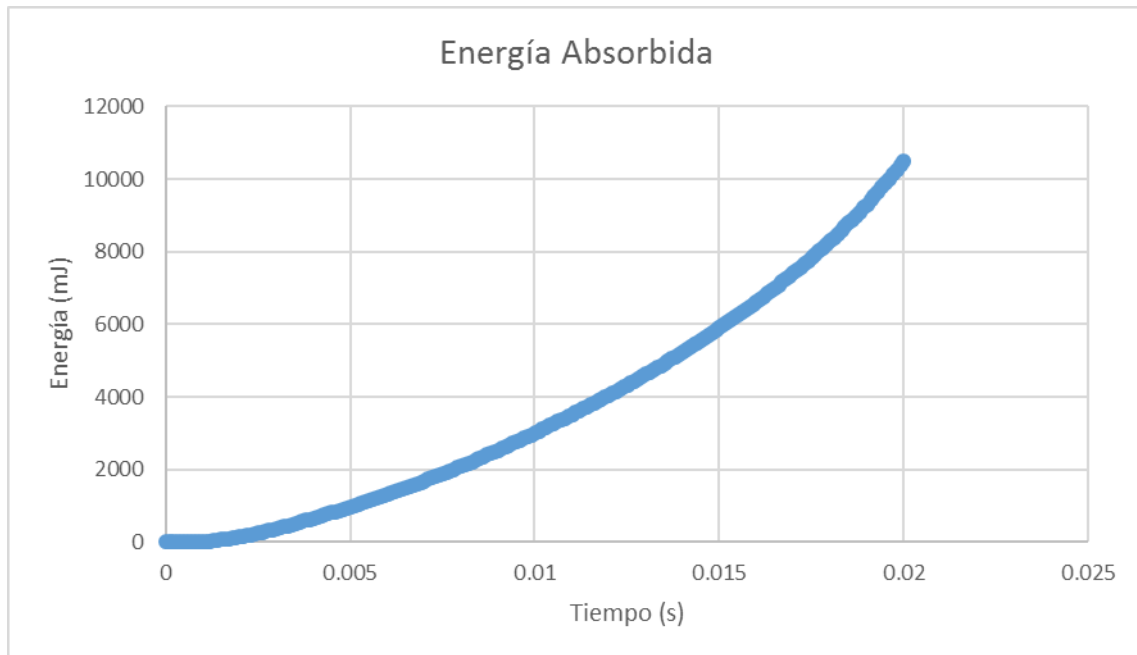


Ilustración 81. Energía absorbida por la espuma Riddell Hard

La forma de la curva termina aproximándose más a una de tipo exponencial que una de tipo lineal, lo que deja de manifiesto que el proceso de endurecimiento del material es mucho mayor en este tramo de ensayo que el resto. Evidentemente, si se continúa con el ensayo, pequeños valores de deformación, acarrearán grandes valores de tensión y por consiguiente de energía.

Para este caso concreto, el valor de energía máximo es de 10.5J.

6.3.4. Rohacell

Las almohadillas Rohacell formadas por un sólo cuerpo de espuma, presentan una curva de tensión-deformación con las zonas más diferenciadas que las de tipo Riddell Hard, por ejemplo.

En éstas se puede ver claramente una primera zona elástica, posteriormente una zona donde el valor de la tensión se mantiene constante con la deformación, y finalmente una zona de endurecimiento bastante inclinada.

Como consiguiente se espera una curva de energía en función del tiempo lineal, donde existe un cierto endurecimiento, pero no es relevante como para generar una curva exponencial.

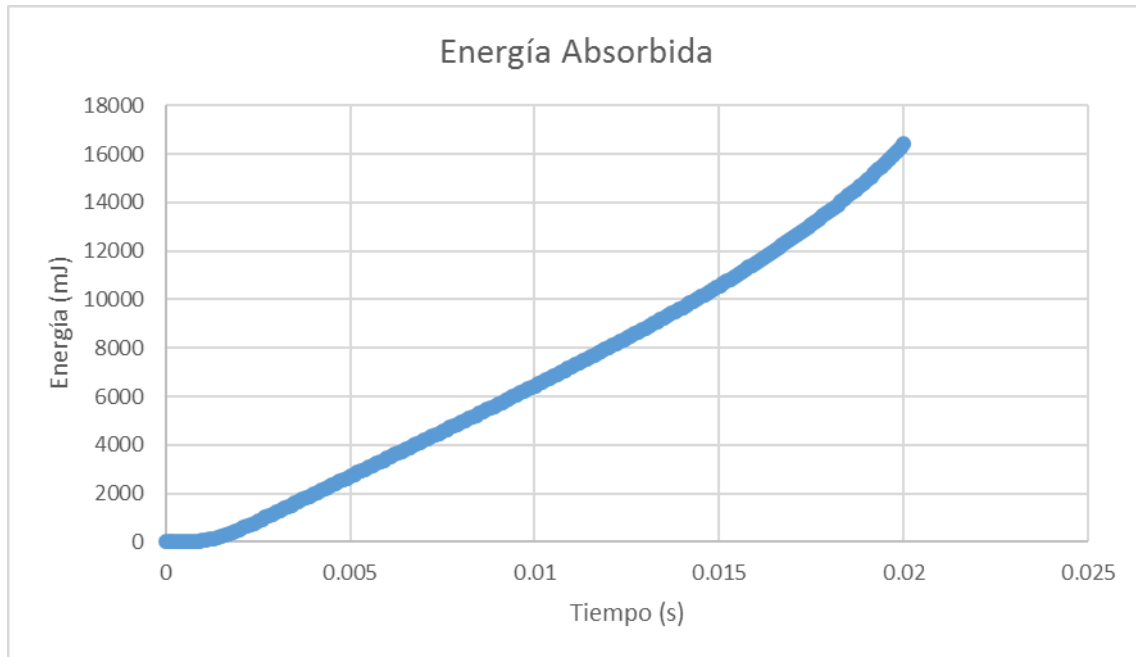


Ilustración 82. Energía absorbida por la espuma Rohacell

En la imagen 82 se puede ver cómo ese endurecimiento es muy pequeño y de esta manera, la energía aumenta linealmente a medida que aumenta la deformación.

El valor máximo absorbido por la espuma en este momento es igual a 16.4J, valor muy similar a los expuestos por la curva de la Riddell Hard.

6.3.5. Oregon

El quinto material a analizar es la espuma Oregon, como ya se ha explicado con anterioridad, son almohadillas compuestas por una parte dura y otra más blanda.

La presencia de esta espuma blanda hace que rápidamente se produzca endurecimiento, es decir, mientras que la parte dura está en la zona elástica, la blanda (debido a que tiene una curva de tensión-deformación inferior a la dura) podría estar ya en el tramo final de su comportamiento, la densificación.

Este fenómeno hace que la curva de la almohadilla sea inestable, ya que cuando se produzca el endurecimiento de la parte más dura, el valor de la energía aumentará drásticamente, generando un cambio brusco en la curvatura.

En esta simulación no se aprecia ese cambio, ya que probablemente el proceso de endurecimiento de la curva más dura no se ha alcanzado.

Es por esto por lo que la energía absorbida por la almohadilla es bastante baja en comparación con otros materiales, como por ejemplo el corcho aglomerado. Esta energía absorbida tiene un valor máximo en $t=0.02$ de 5.83J

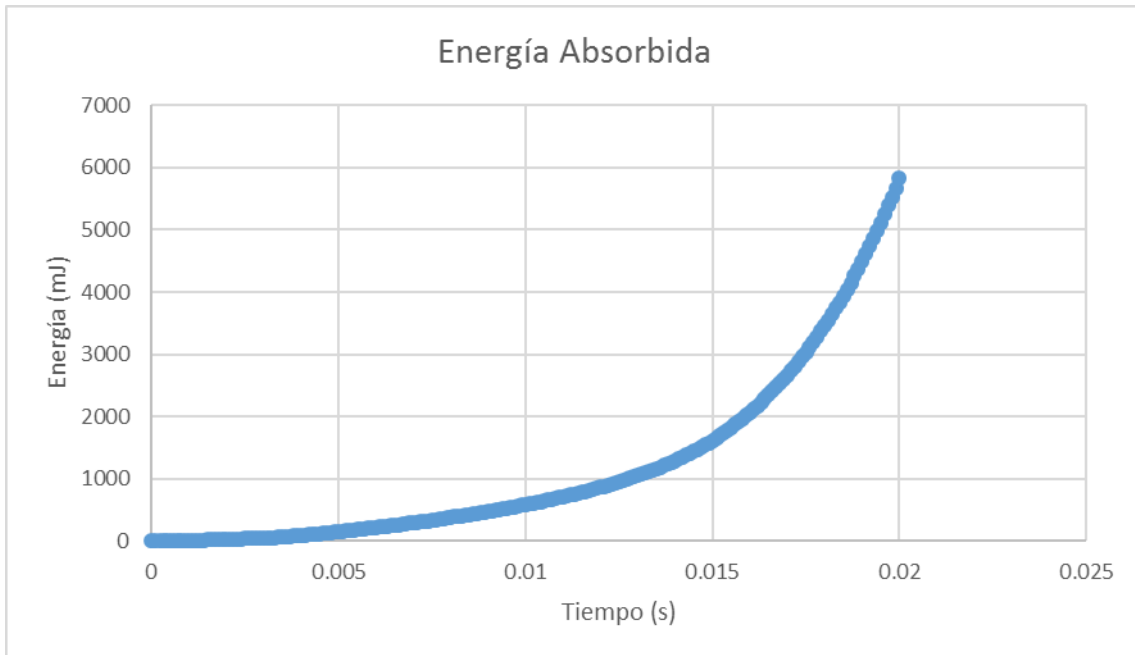


Ilustración 83. Energía absorbida por la espuma Oregon

6.3.6. Team Wendy

6.3.6.1. Team Wendy Soft

Para finalizar se mostrarán las curvas de energía absorbida por las espumas Team Wendy más concretamente, la Team Wendy Soft.

Debido a que la curva de tensión en esta espuma es de las más bajas de todo el proyecto, también es posible que se presente un comportamiento peor en lo que absorción de energía se refiere.

Como ya se preveía, la absorción de energía en este material tal y como muestra la ilustración 84 es inferior al resto. En este caso se podría pensar que la espuma no ha llegado a densificar debido al comportamiento lineal que presenta.

Sin embargo, la densificación en este material es tan pequeña comparada con el resto, que hace que este fenómeno pase inadvertido en la curva de absorción de energía.

El valor máximo de energía absorbida se da al final del ensayo (en $t=0.02$) y es de 0.73J.

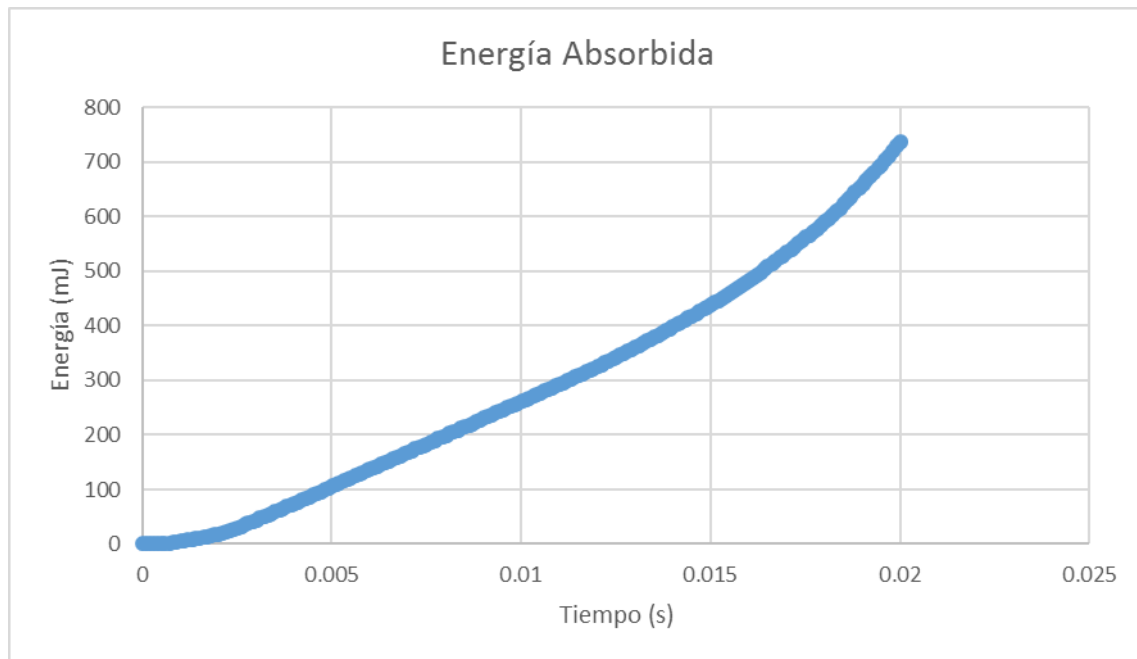


Ilustración 84. Energía absorbida por la espuma Team Wendy Soft

6.3.6.2. Team Wendy Hard

Pasando al análisis de las espumas Team Wendy Hard, se puede esperar un comportamiento más rígido que en el caso anterior. Por tanto, valores de energía absorbida superiores a la parte blanda de la almohadilla.

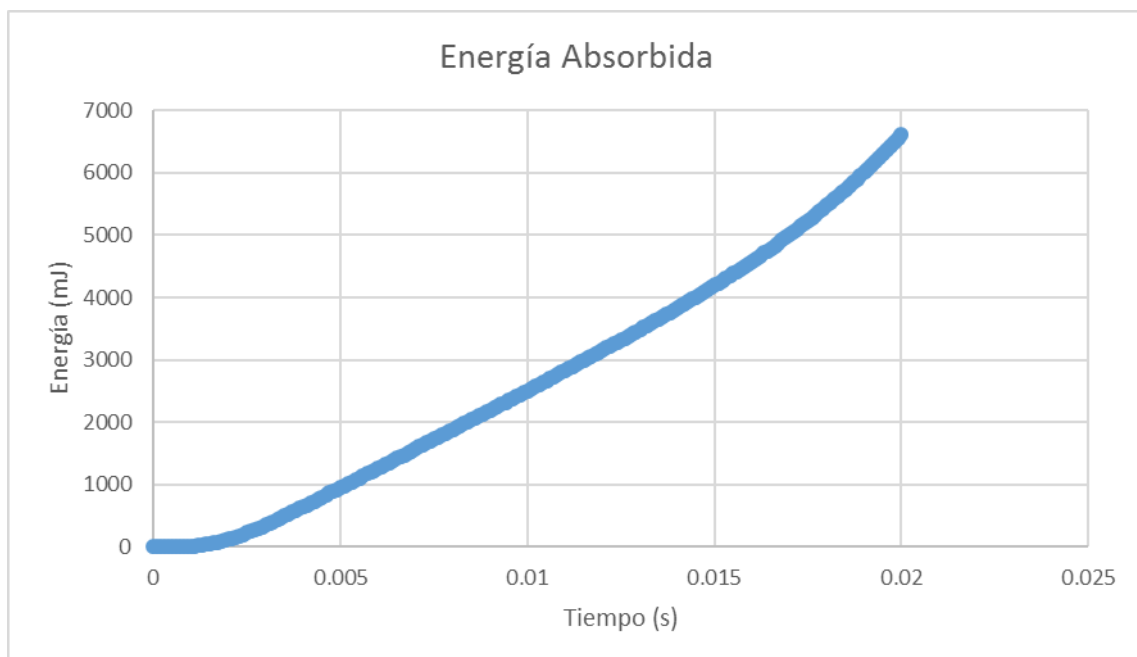


Ilustración 85. Energía absorbida por la espuma Team Wendy Hard

Como se puede ver en la ilustración 85, en el caso de la espuma Team Wendy Hard, la aportación del endurecimiento es despreciable en el ensayo al igual que lo fue con la Team Wendy Soft. Esto se debe a que ese aporte de tensión extra es tan pequeño que pasa inadvertido a medida que aumenta la deformación.

La curva que describe la absorción de energía presenta un comportamiento prácticamente lineal con un valor máximo de 6.6J.

6.3.7. Comparación de resultados con las curvas

En este caso, a diferencia del análisis del HIC, se puede obtener una relación más precisa entre la curva de endurecimiento del material y los resultados obtenidos.

De esta forma, los materiales más duros, con valores de tensión por encima, ofrecen una mayor resistencia a deformarse, siendo necesario una mayor energía para hacerlo.

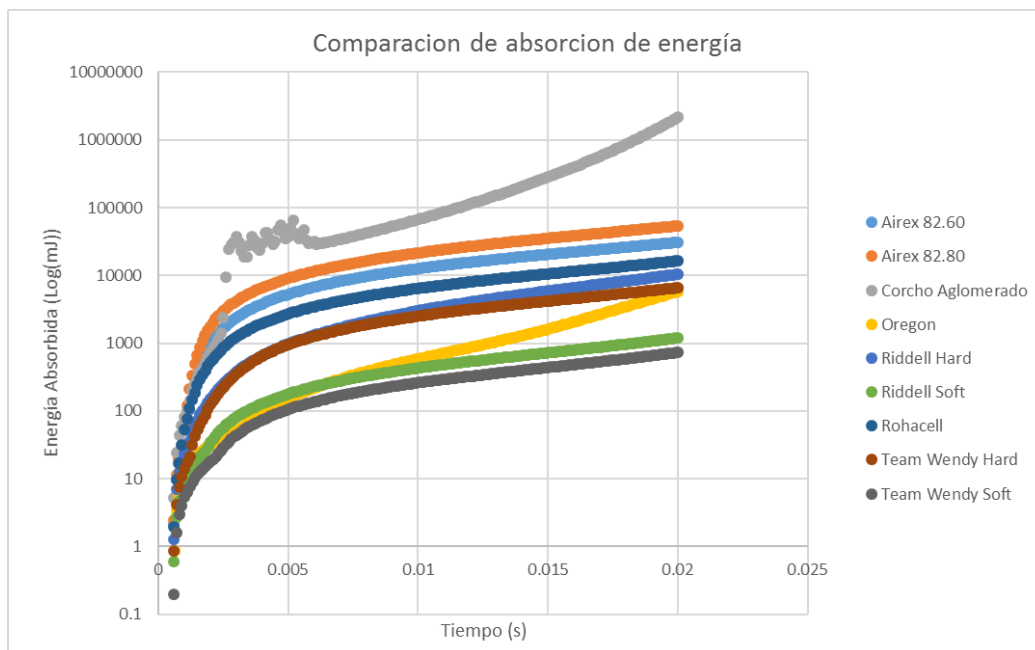


Ilustración 86. Comparación de energía absorbida de cada material ensayado

Parece razonable, ya que la energía absorbida por un material es función de la tensión, el desplazamiento y el área de la sección.

De esta manera, siendo constantes tanto las áreas como los desplazamientos, el valor de la energía depende exclusivamente de la tensión ofrecida por el material.

Tal y como muestran las ilustraciones anteriores, se puede decir que hay un material que absorbe mucha más energía que el resto, el corcho aglomerado.

Posteriormente se encuentran las espumas, pero con un salto importante de energía, quedando la clasificación como muestra la ilustración 87.

Clasificación	Material	Energía (J)
1	Corcho Aglomerado	2170
2	Airex 82.80	54
3	Airex 82.60	31
4	Rohacell	16.4
5	Riddell Hard	10.5
6	Team Wendy Hard	6.6
7	Oregon	5.83
8	Riddell Soft	1.2
9	Team Wendy Soft	0.73

Ilustración 87. Clasificación de los materiales en función de la energía absorbida

7. Conclusiones

Tras realizar las anteriores simulaciones se llega a las siguientes conclusiones:

- El valor del **HIC** es bastante impredecible si sólo se tiene como dato las curvas de deformación del material. Éste parámetro depende tanto de valor de la aceleración sufrida como del tiempo de exposición, y por ello es de especial importancia conocer el resto de condiciones a la que se somete el ensayo.

Definiendo el valor del $HIC=300$ como el umbral para que se sufra una conmoción cerebral (es cierto que este valor equivaldría a un 50% de probabilidad de lesión, pero se ha optado por un análisis conservador) quedaría:

Clasificación	Material	% HIC umbral	Densidad (Kg/m ³)
1	Riddell Hard	6%	97.7
2	Oregon	7%	164
3	Rohacell	8%	58
4	Riddell Soft	9%	66.9
5	Corcho Aglomerado	11%	293
6	Airex 82.60	15%	60
7	Team Wendy Hard	21%	60
8	Team Wendy Soft	24%	55
9	Airex 82.80	30%	80

Ilustración 88. Porcentaje del HIC usado de cada material en el ensayo

- En la segunda clasificación, se puede decir que hay una cierta linealidad entre la curva de tensión-deformación y el valor de energía absorbida. Sin embargo, la curva es tan irregular, que lo más coherente sería hacerlo mediante una simulación de este estilo, ya que calcular el área bajo una curva que no sigue un patrón específico puede resultar un tanto engorroso.

Comparando los materiales analizados con el máximo y mínimo valor de energía quedan los siguientes valores:

Clasificación	Material	% Energía
1	Corcho Aglomerado	100.00%
2	Airex 82.80	2.49%
3	Airex 82.60	1.43%
4	Rohacell	0.76%
5	Riddell Hard	0.48%
6	Team Wendy Hard	0.30%
7	Oregon	0.27%
8	Riddell Soft	0.06%
9	Team Wendy Soft	0.03%

Ilustración 89. Porcentaje de energía absorbida por cada material en el ensayo

7.1. Desarrollos futuros

Partiendo como base este proyecto, se puede continuar el estudio tratando los siguientes aspectos:

- Búsqueda de información de otras espumas para compararlas entre sí, y así tener una mayor probabilidad de encontrar mejores materiales.
- Simulación numérica del cuerpo de protección en cuestión ya sea un casco o un elemento de protección corporal, y aplicar las condiciones impuestas en este ensayo.
- Analizar estos materiales con diferentes velocidades y condiciones de contorno, y ver así, si se llega a algún razonamiento.
- A pesar de que este ensayo está dirigido a la protección personal, también se puede poner en práctica en otros elementos, como, por ejemplo, en la industria automovilística o aeroespacial.
- Hacer el mismo análisis con diferentes geometrías de proyectiles en caso de que la sección no sea uniforme.
- Hacer un análisis de rotura de materiales en el supuesto de que los proyectiles no tengan sección constante.

8. Bibliografía.

- Chen, Wensu, Hong Hao, Dylan Hughes, Yanchao Shi, Jian Cui, y Zhong-Xian Li. 2015. «Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene». *Materials & Design* 69. Elsevier Ltd: 170-80. doi:10.1016/j.matdes.2014.12.024.
- "Euro: CURRENCY:EUR Quotes & News - Google Finance". 2016. *Google.Com*. <https://www.google.com/finance?q=EURUSD>. 22 May 2016
- Fernandes, F. a O, R. J S Pascoal, y R. J. Alves de Sousa. 2014. «Modelling impact response of agglomerated cork». *Materials and Design* 58: 499-507. doi:10.1016/j.matdes.2014.02.011.
- Flores-Johnson, E. a., y Q. M. Li. 2010. «Indentation into polymeric foams». *International Journal of Solids and Structures* 47 (16). Elsevier Ltd: 1987-95. doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.03.025.
- Gibson, Lorna J, y Michael F Ashby. 1997. *Cellular Solids*. Cambridge University Press.
- «How to Identify Plastic Materials Using The Burn Test». s. f. *Boedeker Plastics*.
- Mills, N. J. 2006. «Finite element models for the viscoelasticity of open-cell polyurethane foam». *Cellular Polymers* 25 (5): 293-316.
- Moore, Keith L., Anne M. R. Agur, Arthur F. Dalley, y Keith L Moore. 2010. *Anatomía con orientación clínica*. España: Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins.
- Moss, Wc, y Mj King. 2011. «Impact response of US Army and National Football League helmet pad systems» 0 (January): 1-59.
- Moss, William C, Michael J King, y Eric G Blackman. 2014. «Towards reducing impact-induced brain injury: lessons from a computational study of army and football helmet pads.» *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering* 17 (11): 1173-84. doi:10.1080/10255842.2012.739162.
- Moss, William C., Michael J. King, y Eric G. Blackman. 2009. «Skull flexure from blast waves: A mechanism for brain injury with implications for helmet design». *Physical Review Letters* 103 (10). doi:10.1103/PhysRevLett.103.108702.
- Rodríguez, Javier Colorado. 2011. «Optimización mediante simulación numérica de protecciones ligeras frente a impacto».

Rubber, Modeling. 2013. «Modeling Rubber and Viscoelasticity with Abaqus», 1-346.

Sivertsen, Katrine. 2007. «Polymer foams». *3.063 Polymer Physics*, 1-2.

